БИБЛИОТЕЧКА
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГА
И
УЛЬТРАЗВУКОВИКА

Т. Н. ПЯНДРИНА

# ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ



М А Ш Г И З

БИБЛИОТЕЧКА ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГА И УЛЬТРАЗВУКОВИКА

ВЫПУСК 4

Т. Н. ПЯНДРИНА

# ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ)

*Под общей редакцией*
*Л. Я. ПОПИЛОВА*




ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

Библиотечка электротехнолога и ультразвуковика содержит сведения, касающиеся принципов и технологии основных методов электрической и ультразвуковой обработки, а также применяемого оборудования и приемов работы.

По сравнению с первым изданием Библиотечки настоящее издание расширено, дополнено новыми данными и отражает современный научно-технический уровень электрической и ультразвуковой обработки металлов.

Перечень выпусков приводится в конце каждой брошюры.

В данном выпуске Библиотечки электротехнолога и ультразвуковика рассматривается один из видов электрохимической обработки металлов — электролитическое полирование. Брошюра содержит описание часто встречающихся в производстве электролитов для электролитического полирования, технологии электролитического полирования некоторых изделий и инструмента а также сведения по применению электрополирования в металлографии.

Брошюра рассчитана на технологов, мастеров и квалифицированных рабочих гальванических и отделочных цехов

Рецензент Комитет электрообработки и ультразвука ЛОНТО Машпром

Редактор инж. *А. М. Ямпольский*

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА

Редакция литературы по технологии машиностроения

Заведующий редакцией инж. *Е. П. Наумов*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Процесс электролитического полирования (электрополирование) металлов заключается в анодном растворении их поверхности в соответствующих электролитах; при этом микронеровности поверхности и растворяются в первую очередь, и поверхность сглаживается, приобретая блеск.

Электролитическое полирование во многих случаях заменяет механическое полирование вручную или на кругах, избавляя рабочего от тяжелого физического труда в условиях повышенной вредности.

Электрополирование, помимо устранения трудоемких, вредных для здоровья механических операций полирования и шлифования, ликвидирует затруднения, вызываемые вязкостью или твердостью полируемого изделия, при этом производительность процесса не зависит от твердости полируемого металла. Электролитическому полированию одинаково поддаются как мягкая красная медь или алюминий, так и закаленная цементированная сталь или инструмент из твердого сплава. Кроме того, электрополирование дает возможность обрабатывать детали сложного профиля, внутренние полости, не доступные при ручном или механическом полировании.

При электрополировании повышается производительность и улучшается качество поверхности изделий.

В настоящее время разработана технология электрополирования различных металлов (меди, латуни, алюминия, магния, железа, стали, никеля, серебра, золота и др.), которая применяется в различных отраслях промышленности.

## I. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ



лектролитическое полирование металлов применяется в различных технологических процессах и имеет перспективы широкого промышленного внедрения.

Области применения и назначение электрополирования в отдельных отраслях промышленности приведены в табл. 1.

Электрополирование применяют особенно эффективно для обработки изделий сложной формы или внутренних полостей деталей из нержавеющей стали, когда механическая обработка затруднительна.

Однако полная замена механического полирования полированием электролитическим невозможна. Поверхность изделия, полученная в результате пескоструйной обработки, после электрополирования приобретает блеск, но остаются крупные риски и шероховатости. Таким образом, электрополированием устраняют только мелкие риски и шероховатости, высота которых не превышает 30 *мк*, в то время как мелкая шероховатость не может быть устранена механической полировкой до тех пор, пока не будет удалена крупная шероховатость.

Применение электролитического полирования взамен механического оправдало себя при отделке гальванических покрытий. Введение электрополирования гальванических покрытий ликвидирует ручные операции механического полирования, позволяет одновременно обрабатывать значительное количество изделий. Толщина снимаемого слоя регулируется режимом полирования: плотностью тока, температурой и продолжительностью процесса.

В случае неравномерного гальванического покрытия способ электролитического полирования неприемлем. При этом на участках поверхности изделий с толщиной гальванического покрытия, меньшей средней расчетной, после электрополирования может

Таблица 1

| Область применения | Полируемый объект | Цель полирования |
|---|---|---|
| Общее и специальное машиностроение, энергетика, электромашино- и аппаратостроение | Арматура стальная, бронзовая, латунная для водяных, паровых, воздушных, газовых магистралей (краны, клапаны и др.) | Снижение трудоемкости обработки; уменьшение потерь на трение; повышение коррозионной стойкости; очистка внутренних полостей; улучшение внешнего вида; экономия полировочных материалов |
| | Детали машин, механизмов, станков, аппаратов различных форм и размеров, изготовленные из черных, цветных и легких металлов | Повышение чистоты поверхности; сокращение трудоемкости обработки; экономия полировочных материалов; повышение коррозионной стойкости; снижение коэффициента трения; улучшение внешнего вида; нанесение блестящих или матовых надписей, знаков, сеток |
| | Детали машин, механизмов, станков, аппаратов с поверхностными металлопокрытиями | Повышение прочности сцепления и улучшение свойств металлопокрытия (снижение пористости, повышение чистоты, придание блеска, стойкости); сокращение трудоемкости основных операций и всего цикла; экономия полировочных материалов; экономия металлов |
| | Металлические детали, изготовленные штамповкой, прошивкой, вырубанием, прокалыванием | Удаление грата и заусениц, сглаживание краев и кромок; улучшение чистоты поверхности и внешнего вида |
| | Детали машин, работающие в условиях трения (кольца прядильных машин, рогульки шпинделей и т. п.) | Снижение трения; повышение долговечности; экономия электроэнергии; снижение себестоимости |
| | Кольца (желоба) шариковых подшипников | Улучшение микрогеометрии; снижение коэффициента трения; снижение стоимости изготовления |
| | Пружины стальные и бронзовые (цилиндрические ленточные, плоские, специальные) любых типоразмеров | Повышение усталостной и коррозионной стойкости; уменьшение опасности наводороживания облегчение обработки и снижение трудоемкости; повышение производительности |



*Продолжение табл. 1*

| Область применения | Полируемый объект | Цель полирования |
|---|---|---|
| Общее и специальное машиностроение, энергетика, электромашино- и аппаратостроение | Резервуары различного назначения, оболочки, изделия и детали с внутренними полостями | Полирование внутренних полостей, труднодоступных при обычных методах полировки |
| | Трубы из различных металлов (прямые, угольники, тройники и др.) | Повышение гладкости внутренних поверхностей; уменьшение трения протекающих продуктов; повышение коррозионной стойкости; снижение трудоемкости; удешевление операции |
| | Турбинные лопатки, турбинные детали из специальных сталей | Повышение коррозионной и эрозионной стойкости; снижение трудоемкости и механизация обработки; повышение производительности |
| | Фрикционные диски | Улучшение микрогеометрии поверхности, обеспечивающее прилегание по большей площади и передачу больших усилий |
| | Штампуемые или вытягиваемые детали различных типов и размеров, изготовляемые из черных и цветных металлов | Снижение усилий и уменьшение брака по трещинам в процессах штампования или вытяжки за счет предварительной обработки поверхности электрополированием |
| Приборостроение оптика, акустика, светотехника, вакуумная техника | Детали электронных приборов, аноды ламп и различные изделия электровакуумной техники | Улучшение специальных характеристик; снижение холодной эмиссии; удаление адсорбированных газов; повышение производительности |
| | Детали электро- и радиоаппаратуры различных видов | Улучшение электрических и магнитных свойств |
| | Зеркала и отражатели светотехнической аппаратуры, детали оптико-механической промышленности | Повышение коэффициента отражения света и коррозионной стойкости, экономия электроэнергии; удешевление и ускорение изготовления |
| | Иглы для приборов и аппаратуры различного назначения | Заострение и получение требуемой микрогеометрии; повышение производительности |

| Область применения | Полируемый объект | Цель полирования |
|---|---|---|
| Приборостроение оптика, акустика, светотехника, вакуумная техника | Ленточные и конденсаторные микрофоны и детали специальных акустических приборов | Получение тончайшей (1—2 *мк*) ленты с соответствующими акустическими характеристиками |
| | Шестеренки механизмов (счетчиков и т. п.) | Повышение чистоты поверхности |
| Инструментальное производство | Инструмент металлообрабатывающий и деревообрабатывающий (вновь изготовленный) различных типов и размеров из углеродистых или быстрорежущих сталей | Удаление поверхностного отпущенного при заточке слоя; улучшение микрогеометрии поверхности, облегчающее сход стружки, и уменьшение коэффициента трения, приводящие к повышению стойкости инструмента в эксплуатации |
| | Инструмент изношенный (напильники) | Восстановление режущей способности и повышение коррозионной стойкости |
| | Калибры (пробки, скобы), шаблоны и другой мерительный инструмент | Доводка до требуемых размеров; улучшение микрогеометрии поверхности; повышение коррозионной стойкости; снижение трудоемкости обработки |
| | Штампы чеканные, пресс-формы для пластмасс | Улучшение микрогеометрии поверхности; снижение трудоемкости обработки |
| Исследование и контроль качества металлов и деталей | Образцы для измерения микротвердости | Снятие наклепа |
| | Образцы для электронной микроскопии | Получение шлифов, свободных от дефектов, вносимых механической обработкой |
| | Различные изделия из легированных и специальных сталей | Снижение интеркристаллитной коррозии |
| | Шлифы для металлографических исследований | Снижение трудоемкости изготовления; получение недеформированной структуры поверхности; выявление деталей строения у мягких металлов и сплавов |





| Область применения | Полируемый объект | Цель полирования |
|---|---|---|
| Предметы бытового обихода | Иглы швейные, патефонные и т. п. | Заострение; повышение гладкости; повышение коррозионной стойкости |
| | Столовые приборы, ложки вилки, ножи из алюминия, серебра, сталей. Чайники из нержавеющей стали или латуни | Снижение трудоемкости отделочных операций; повышение производительности; улучшение внешнего вида; повышение коррозионной стойкости; экономия полировочных материалов |
| | Ювелирные изделия — кольца, броши, серьги и т. п. из серебра и цветных сплавов | Снижение трудоемкости отделки; повышение блеска и коррозионной стойкости |

оголиться основной металл или промежуточный слой гальванического покрытия.

Электролитическое полирование оказывает положительное влияние на фрикционные качества поверхности. Так, например, по данным опытов, проведенных на ленинградском заводе текстильного машиностроения им. К. Маркса с прядильными кольцами, коэффициент трения колец после электрополирования снижается в 3—5 раз.

Надо отметить также влияние электрополирования на сцепление гальванического покрытия с основным металлом. Если перед нанесением гальванического покрытия производить электрополирование поверхности, то сцепление гальванопокрытия с основным металлом будет значительно лучше сцепления с поверхностью, отполированной механическим способом.

Коррозионная стойкость поверхности любого металла после электрополирования повышается в несколько раз, что объясняется образованием тончайшей пассивной пленки на поверхности металла.

## II. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ




лектрополирование — процесс анодного растворения поверхности металла, протекающий в том или ином электролите.

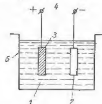
Принципиальная схема установки для электрополирования изображена на фиг. 1.

Электрополирование представляет собой процесс, обратный электролитическому осаждению металлов: обрабатываемые изделия помещают в качестве анодов в ванну с соответствующим электролитом и выдерживают их при заданном режиме в течение определенного времени — от секунд до десятков минут. Это сопоставление двух противоположных процессов является

лишь принципиальным и не определяет всей сложности еще не изученного процесса.

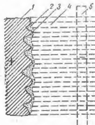
Большую роль играет анодная поляризация, которая, в свою очередь, зависит от состава и концентрации электролита, от анодной плотности тока, температуры и перемешивания электролита, а также от ряда других факторов. Различные факторы в этих двух процессах не всегда влияют в противоположном направлении. В некоторых случаях одни и те же факторы действуют примерно в одинаковом направлении как при электролитическом (гальваническом) осаждении, так и при электролитическом полировании.

Если основной задачей гальванических процессов является дости-




Фиг. 1. Принципиальная схема установки для электрополирования:

*1*—электролит; *2*—катод; *3*—анод (полируемое изделие); *4*—подвод тока от источника; *5*—ванна.




Фиг. 2. Схема расположения пленки на поверхности анода:

*1*—анод; *2*—анодная пленка; *3*—слой пленки, обладающий наибольшим сопротивлением; *4*—электролит; *5*—катод.

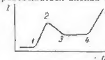
жение возможно более качественного покрытия (отсутствие пористости, сцепление с основным металлом равномерность покрытия и т. д.), то электрополирование преследует цель получения возможно более гладкой поверхности при наименьшем съеме металла и наиболее равномерном растворении поверхности детали. Существует несколько теорий по-разному объясняющих процесс электрополирования.

Остановимся на одном из весьма вероятных и простых предположений об этом процессе. Так, считают, что сглаживание поверхности происходит из-за более интенсивного растворения металла на вершинах микровыступов. Причиной такого интенсивного растворения отдельных участков является образование на поверхности анода вязкой пленки. Вязкая пленка (фиг. 2) состоит из продуктов анодного растворения металла в электролите, заполняет впадины и сравнительно тонким слоем обволакивает выступы. Скорость растворения металла на различных участках анодной поверхности зависит главным образом от плотности тока. Вследствие высокого электрического сопротивления пленки и способности электрического тока концентрироваться на остриях плотность тока на по-

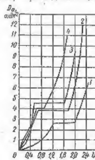


верхности впадины будет значительно меньше, чем на поверхности выступов. Поэтому скорость растворения вершин выступов будет больше скорости растворения дна впадин. Толщина, вязкость и электрическое сопротивление пленки зависят от материала детали, химического состава электролита, а также от скорости диффузии пленки в электролите. Таково одно из объяснений вероятного механизма электрополирования, принадлежащее французскому ученому Жаке.

Изучая процессы электрополирования меди, Жаке установил, что кривая зависимости силы тока от напряжения *I—U* (фиг. 3) имеет своеобразный характер. При повышении напряжения ток растет в соответствии с законом Ома пропорционально напряжению (участок *1—2*) до того момента, когда в точке *2* сила тока в цепи падает на протяжении участка *3—4*, несмотря на повышение напряжения, создавая на кривой горизонтальную площадку. Следовательно, в точке *2* начинает образовываться вязкая пленка




Фиг. 3. Кривая зависимости силы тока от напряжения по Жаке.




Фиг. 4. Кривые зависимости плотности тока $D_a$ от напряжения при электрополировании различных сплавов в сернолимонном электролите:

*1*—нержавеющая сталь; *2*—сталь РФ1; *3*—железо; *4*—сплав Ф1.

с большим омическим сопротивлением. В течение времени, соответствующего существованию горизонтального участка *3—4*, происходит полирование поверхности без выделения газа, а при переходе процесса в область участка *4—5* оно сопровождается бурным газовыделением. Бурное выделение газа способствует отрыву пленки на микровыступах поверхности металла. Выступы и неровности, освобожденные от пленки, под влиянием растворяющего действия электролита и тока сглаживаются.

Эти наблюдения, установившие связь между поляризацией анода и возникновением блеска поверхности, послужили основанием для подтверждения гипотезы о вязкой пленке как основном факторе электрополирования.

Установлено, что горизонтальная площадка кривой *I — U* имеется при электрополировании как меди, так и других металлов и сплавов (фиг. 4). Величина площадки, а следовательно, и омическое сопротивление в период электрополирования у разных сплавов различное.

## III. СХЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ



ехнологический процесс электролитического полирования аналогичен процессу электролитического покрытия металлами, поэтому гальванические цехи легко могут быть использованы для электрополирования. Технологический процесс электрополирования имеет три этапа: подготовка деталей перед электрополированием, электрополирование и обработка после электрополирования.

Этот процесс состоит из следующих операций:

1) механической подготовки поверхности (шлифования, полирования);
2) монтажа деталей на приспособление;
3) обезжиривания;
4) промывки;
5) электрополирования;
6) промывки в холодной воде;
7) нейтрализации в щелочном растворе;
8) промывки в горячей воде;
9) сушки;
10) демонтажа с приспособления;
11) контроля;
12) консервации.

Механическая подготовка поверхности производится путем шлифования и полирования с целью получения установленных значений чистоты поверхности, для чего шлифованные детали подвергаются контролю. Обычно электрополированная поверхность приобретает повышенную гладкость, если после механической обработки чистота поверхности соответствовала 5—6-му классу по ГОСТ 2789—59.

Монтаж деталей на приспособление имеет целью жесткое закрепление электрического контакта и предотвращение искажения контура детали посредством экранирования.

Обезжиривание нужно производить в том случае, если на поверхности изделия имеется заметный слой масел и смазок. Поверхность обезжиренной детали электрополируется более равномерно, что необходимо при размерном электрополировании.

Промывка выполняется с целью предотвращения заноса в ванну электрополирования различных загрязнений.

Электрополирование проводится по заданному режиму с целью получения поверхности, отвечающей техническим требованиям чертежа.

Промывка в холодной воде приостанавливает химическое действие электролита. Следует указать, что промывка в специальной ванне-сборнике для улавливания электролита не всегда рентабельна, так как слой электролита, прилегающий к поверхности, насыщен продуктами распада поверхностного слоя металла и кислоты (вязкой пленкой).



Таблица 2

**Возможные варианты технологических процессов электрополирования**

| Операции | Номера вариантов | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Шлифование черновое | + | — | — | + | — | + | — | — |
| Шлифование чистовое | + | — | — | — | + | — | — | — |
| Полирование предварительное | + | — | — | — | — | — | — | — |
| Глянцевание | + | — | — | — | — | — | — | — |
| Обезжиривание растворителями | + | + | — | — | — | — | — | — |
| Обезжиривание химическое | + | — | — | — | — | — | — | — |
| Обезжиривание электрохимическое | — | — | — | + | + | — | — | — |
| Промывка в холодной воде | + | + | + | + | + | + | — | — |
| Промывка в горячей воде | + | — | — | — | — | — | — | — |
| Травление химическое | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Травление электрохимическое | + | — | — | — | — | — | — | — |
| Промывка в холодной воде | + | — | + | — | — | — | — | — |
| Декапирование | + | — | — | — | — | + | — | — |
| Промывка в холодной воде | + | — | — | — | — | + | + | — |
| Электрополирование | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Промывка в сборнике | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Промывка в холодной воде | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Нейтрализация в содовом растворе | + | — | — | — | — | — | + | — |
| Промывка в горячей воде | + | — | + | + | + | + | + | + |
| Сушка | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Механическое глянцевание | + | — | — | — | — | — | — | — |
| Консервация горячим маслом | + | — | — | — | — | — | — | — |

Примечание. Номера вариантов обозначают полирование: *1* — детали ответственного назначения для получения максимально достижимого качества поверхности при низкой исходной чистоте ее; *2* — штампованных деталей неответственного назначения из холоднокатаного металла; *3* — деталей неответственного назначения для придания блеска без существенного повышения чистоты поверхности; *4* — деталей неответственного назначения с повышенными требованиями к чистоте поверхности; *5* — деталей неответственного назначения из горячекатаного металла; *6* — деталей ответственного назначения, штампованных из холоднокатаного металла; *7* — деталей, имеющих высокую чистоту исходной поверхности, без заметных загрязнений.

**Нейтрализация в щелочном растворе** проводится с целью удаления с поверхности следов электролита, вызывающих коррозию.

**Промывка в горячей воде** ликвидирует возможные следы электролита и облегчает последующую сушку изделий.

**Сушка** горячим воздухом или опилками предотвращает коррозию поверхности изделия оставшейся водой.

**Демонтаж** с приспособления не проводится в случае последующего гальванопокрытия.

**Консервация** готовых изделий производится после окончания всех предыдущих операций и контроля качества электрополирования.

Таблица 3

**Технологический процесс электрополирования фрез**

| Наименование операции | Состав раствора: наименование компонента | Состав раствора: содержание в литре раствора | Режим работы: температура в град. | Режим работы: плотность тока в $a/дм^2$ | Режим работы: длительность в мин. |
|---|---|---|---|---|---|
| Монтаж на приспособления | — | — | — | — | — |
| Электрообезжиривание | Едкая щелочь | 65 г | 20–25 | 3 6 | 2–2,5 |
| | Тринатрийфосфат или углекислый натрий | 25 г | | | |
| Промывка в горячей воде | — | — | 70 80 | — | 0,5–1,0 |
| Электрополирование | Фосфорная кислота | 800 $см^3$ | 70–90 | 40–60 | 3–4 |
| | Серная кислота | 100 $см^3$ | | | |
| | Хромовый ангидрид | 100 г | | | |
| | Вода | 100 $см^3$ | | | |
| Промывка в холодной воде | — | — | 15–20 | — | 0,5–1,0 |
| Нейтрализация | Сода кальцинированная | 25 г | 15–20 | — | 0,5–1,0 |
| Промывка в горячей воде | — | — | 90–95 | — | 0,5–1,0 |
| Высушивание в сухих опилках | — | — | 40–50 | — | — |
| Консервация маслом | Минеральное масло | — | 110–120 | — | 0,5–1,0 |
| Демонтаж с подвесок | — | — | — | — | — |
| Протирка ветошью | — | — | — | — | — |



В зависимости от требований к обрабатываемой поверхности, характера подготовки и ее свойств количество, качество и метод выполнения вспомогательных операций технологического процесса могут меняться.

В табл. 2 перечислены варианты технологического процесса электрополирования, наиболее часто встречающиеся в пратике.

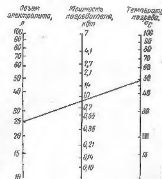
В табл. 3 для примера приведена схема технологического процесса электрополирования фрез.

## IV. ОБОРУДОВАНИЕ УЧАСТКА ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ

По своей конструкции и оборудованию участок электрополирования, имея некоторые специфические особенности, близок участку хромирования гальванического цеха.

В зависимости от характера полируемого изделия, назначения и требования к нему определяется и соответствующее оборудование участка электрополировки. Основным оборудованием участка электрополирования, как и участка хромирования, являются: ванны, приспособления для крепления изделий, источник постоянного тока и оборудование для регулирования и измерения постоянного тока.

**Ванны для электрополирования.** Осуществление процесса электрополирования обычно происходит в ванне. Если же детали полые, крупных размеров и требуют электрополировки внутренней поверхности, то в качестве ванны-электролизера используется сама деталь. Для электрополирования деталей небольших размеров (инструмента и других изделий) обычно используются стационарные ванны, оборудованные бортовой вентиляцией, устройствами для подогрева электролита или его охлаждения. Последнее требуется в тех случаях, когда мощность, подводимая к ванне, превышает 25—40 *вт/л*.




Фиг. 5. Номограммы для определения затрат тепла, расходуемого на нагрев электролита.

Для кратковременных работ, не требующих обеспечения точного температурного режима, с целью нагрева электролитов могут применяться электрические плитки. В производственных условиях следует применять нагреватели и змеевики, помещенные в защитных оболочках внутри самой ванны.

Конструирование и расчет нагревателей производят обычными приемами. На фиг. 5 приведена номограмма, позволяющая определить количество тепла, необходимого для нагрева одного из широко применяемых электролитов — сернофосфорнохромового.

На фиг. 6 показана конструкция стандартной ванны, применяемой для электрополирования.

Наиболее удобным подогревательным устройством для эксплуатации такой ванны является водяная рубашка. Применение водяной рубашки для подогрева электролита исключает возможность перегрева электролита. Кроме того, водяная рубашка может быть использована для охлаждения электролита в случае его перегрева в процессе электрополирования.

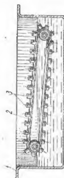
Внутренняя поверхность ванны для электрополирования должна быть облицована химически стойким материалом. В качестве такого материала может быть использован любой материал, химически стойкий в сильных кислотах при температуре 85—90°С (табл. 4).

Таблица 4

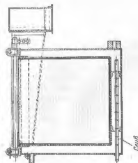
**Материалы внутренней облицовки электрополировочных ванн**

| Типы электролитов | Материал облицовки | |
|---|---|---|
| | рекомендуемый | допускаемый |
| Фосфорнокислые, сернокислые холодные | Пластмассы (винипласты, оргстекло и др.), стекло, фарфор, керамика, каменное литье | Свинец, кислотоупорные стали, битумные композиции, эмаль |
| Азотнокислые и хлористокислые холодные | Стекло, фарфор, керамика | Кислотоупорная сталь |
| Сернолимонные, сернофосфорные, серноуксусные горячие | Термостойкие винипласты, каменное литье, керамика, жаростойкое стекло | Свинец, эмаль, кислотоупорная сталь |
| Хромовосернофосфорные и хромовофосфорные горячие | Термостойкие винипласты, каменное литье, жаростойкое стекло | Кислотоупорная сталь, свинец |
| Сереброшанистые холодные | Стекло, фарфор, керамика, эмаль | Пластмассы, лаковые покрытия, сталь |
| Щелочные холодные | Углеродистая сталь, резина, керамика, эмаль | Оргстекло и другие пластмассы |
| Щелочные горячие | Углеродистая сталь, керамика | Пластмассы, стойкие к щелочам; эмаль |

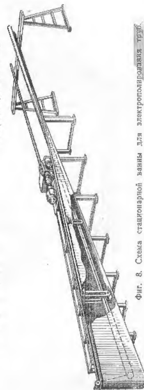




Фиг. 7. Схема ванны-автомата для электрополирования сверл.



Фиг. 6. Стандартная ванна для электрополирования.


Фиг. 8. Схема стационарной ванны для электрополирования труб.

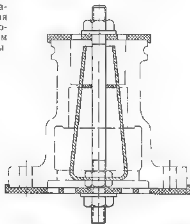
Для электрополирования однотипной массовой продукции, например инструмента, шестерен и других мелких деталей, ванна может быть сконструирована вместе с автоматическим устройством конвейерного типа. Схема такой ванны показана на фиг. 7. Деталь (инструмент) *2* закрепляется на ленте-транспортере *3* и продвигается в ванне *1* в течение заданного для электрополирования времени

На фиг. 8 показана стационарная ванна для электрополирования труб.

Для промывки, нейтрализации, обезжиривания и т. д. используются имеющиеся в гальваническом цехе стационарные ванны



Фиг 9. Освинцованная стальная подвеска для электрополирования деталей



Фиг. 10 Приспособление для полирования внутренней поверхности сложных деталей

**Приспособление для крепления изделий (подвески).** Эти приспособления должны удовлетворять следующим требованиям

1) обеспечивать равномерный подвод тока ко всем участкам полируемой детали без нарушения контакта, без разогрева и без потерь на переходном сопротивлении,

2) иметь минимальные габариты, чтобы не экранировать изделие, не расходовать бесполезно ток и электролит

3) быть простыми в изготовлении, удобными и прочными в эксплуатации и дешевыми,

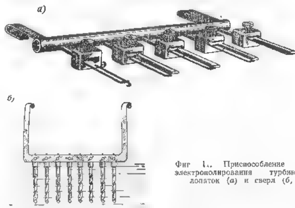
4) не растворяться в электролите и не загрязнять его

Ни одно из применяемых в настоящее время приспособлений для закрепления изделий не может считаться идеальным

Наиболее часто применяются проволочные и стержневые подвески (крючки, штанги, петли), винтовые или пружинные зажимы различных типов, магнитные крепления (постоянные магниты и электромагниты)



В практике широко используются подвески обычных типов, применяемые в гальванотехнике. С целью уменьшения растворения материала подвески в электролите и одновременного использования ее в качестве дополнительного нерастворимого анода в хромовых электролитах рекомендуется покрывать ее слоем свинца. Образец такой стальной освинцованной подвески, применяемой в промышленности, представлен на фиг. 9




Фиг 11. Приспособление для электрополирования турбинных лопаток (*а*) и сверл (*б*)

При полировании крупных деталей достаточный контакт с приспособлением получается за счет тяжести детали. Для надежного крепления мелких легких изделий необходим жесткий контакт со специальным зажимом. На фиг. 10 показано одно из приспособлений

Для изделий сложной формы, требующих сохранения точных размеров, применяют индивидуальные приспособления. На фиг 11, *а* изображено приспособление для полирования турбинных лопаток, а на фиг 11, *б* для сверл.

Нарушение контакта изделий с подвеской отражается на качестве изделия, которое получается неполированным, темным, растравленным, либо покрывается (контактно) иным металлом из раствора. Нарушение контакта создает также ожоги, цвета побежалости и оплавление плохо контактирующих участков. Иногда (при больших силах тока) искрение в месте плохого контакта вызывает «хлопки» — взрывы постоянно выделяющейся над ванной смеси кислорода и водорода. Неудовлетворительный контакт лишь одного изделия в массовой подвеске вызывает возра-

стание плотности тока на соседних деталях, изменяя заданный режим полирования. Отсюда ясна важность и необходимость обеспечения жесткого контакта между полируемой деталью и подвеской.

В качестве материала для подвесок используют медь, латунь, свинец, легированные стали, освинцованную стальную проволоку. Нерабочие участки подвесок в холодных электролитах обычно изолируют резиной, метакриловыми, бакелитовыми, дивинилацетиленовыми лаками, виниловыми смолами и др. Наилучшие результаты для изоляции подвесок дает перхлорвиниловый лак.

В горячих хромовых электролитах резина и многие лаки нестойки. Наилучшими являются органическое стекло, бакелитированные пластики (типа текстолита с высоким содержанием смолы), хлорвиниловая пленка с наполнителями. В хлорнокислых и спиртовоазотных электролитах применение органических материалов недопустимо. Изоляционными материалами погружаемых участков в таких электролитах служат стекло, керамика или кварц.

Крупногабаритные детали крепятся в нескольких точках, чтобы уменьшить сопротивление единичного подвода тока и приспособления для укрепления и снизить потери напряжения.

Иногда целесообразно использовать одни и те же подвески для прохождения детали через травильные, полировочные и гальваностегические ванны, особенно в установках непрерывного действия, но следует учитывать, что в этом случае подвески будут покрываться металлом.

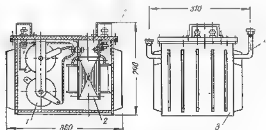
Одним из требований, предъявляемых к приспособлениям для крепления, является обеспечение полного погружения полируемых изделий в электролит. При неполном их погружении на границе раздела «жидкость—воздух» наблюдается своеобразное, относящееся к недостаткам процесса явление интенсивного растворения и растравливания сравнительно широкой зоны металла.

Массовое полирование мелких деталей из углеродистых сталей или латуней в барабанах, сетках, корзинах и т. п. обычно затруднительно, так как при относительно высоких плотностях тока, требующихся для процесса, малейшее нарушение контакта между отдельными деталями, неизбежное в этих условиях, вызывает прекращение процесса, ожоги, порчу поверхности и превращает отдельные детали в биполярные электроды, неравномерно полирующиеся либо, наоборот, покрывающиеся налетом металла.

**Электрическое питание ванны электрополирования.** Применяемые в гальванических цехах стационарные ванны и высокопроизводительные конвейерные установки для электрополирования требуют самых различных мощностей. Источниками питания ванн для электрополирования обычно служат низковольтные многоамперные двигатель-генераторы, а также различные выпрямительные устройства. В последнее время широко вошли в эксплуатацию



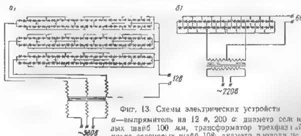
селеновые и германиевые выпрямители, обладающие большой устойчивостью в работе. Предельное напряжение выпрямленного тока на одну шайбу селенового выпрямителя доходит до 15 в. По сравнению с купроксными и сульфидными, селеновые выпря-




Фиг. 12. Селеновое выпрямительное устройство.
1- блок селеновых шайб; 2—понижающий трансформатор; 3—кожух; 4—патрубок.

мители имеют малые потери на старение, не боятся тряски и низких температур.

На ряде заводов в гальванических цехах используются малогабаритные селеновые выпрямительные устройства для индивидуального питания ванн. Целесообразность их обусловлена широким




Фиг. 13. Схемы электрических устройств.
а—выпрямитель на 12 в, 200 а: диаметр селеновых шайб 100 мм, трансформатор трехфазный, число селеновых шайб 108; диаметр провода первичной обмотки 1,88 мм, число витков первичной обмотки 260; размер шины вторичной обмотки 8,6×5,5 мм; число витков вторичной обмотки 16, б—схема электрического устройства, работающего от однофазной цепи.

использованием различных автоматических устройств для регулирования и контроля режима ванн (изменения плотности тока, температуры и т. д.)

Селеновые выпрямители рассчитаны на различные токи и напряжения. Они собираются из стандартных селеновых шайб диаметром 100 мм по специальным схемам. Напряжение на блок

шайб подается от понижающих однофазных и трехфазных трансформаторов, смонтированных на одной панели с блоками. Выпрямители монтируют в кожух и заливают трансформаторным маслом, что позволяет повысить сопротивление и увеличить плотность тока на шайбу в 1,6 раза, а следовательно, значительно уменьшить габариты устройства. Кожух имеет ребра или трубы, способствующие охлаждению.

На фиг. 12 показано селеновое выпрямительное устройство на 6 *в*, 50 *а*.

Электрические схемы устройств, работающих от трехфазной (*а*) и однофазной (*б*) сети, показаны на фиг. 13.

Если ванны требуют повышенных токов, возможно параллельное соединение выпрямителей.

Малогабаритные выпрямители позволяют сэкономить энергию, освободить цехи от громоздких коммуникаций в виде шин, избежать падения напряжения.

**Щиты управления ваннами электрополирования.** Одним из условий получения качественной электрополированной поверхности является подбор и точное соблюдение технологического режима, плотности тока, температуры и т. д.

Регулирование силы тока в ванне для электрополирования осуществляется различными способами. Например, выбирая технологический режим работы ванны, можно регулировать плотность тока, а следовательно, и общую силу тока ванны, не изменяя электрического режима питающей сети. В случае питания от шунтового генератора или выпрямителя можно изменить напряжение, а следовательно, и плотность тока в цепи ванны, воздействуя на шунтовой регулятор или включая дополнительные витки трансформатора выпрямителя. Включая в цепь ванны регулировочный реостат, можно изменить общую силу ее тока. Выбор реостата и расчет его ступеней производится с учетом технологического режима. Реостаты рубильникового типа имеют обычно до шести ступеней и позволяют осуществлять только грубую регулировку силы тока электрополировочной ванны.

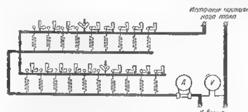
В последнее время в промышленности применяются два типа щитов управления, предназначенных как для грубого, так и для точного регулирования тока.

Работа первого типа щита основана на принципе последовательного включения в цепь ванны рубильниковых реостатов с параллельными секциями, второго — на регулировании напряжения в первичной обмотке трансформатора выпрямителя. Трансформатор смонтирован совместно с малогабаритными селеновыми или германиевыми выпрямителями, предназначенными для индивидуального питания электрополировочной ванны.

Щиты первого типа рассчитаны на весьма низкое для электрополирования напряжение 9—12 *в* и силу тока до 200—400 *а*. Щит на 200 *а* имеет ступени грубого регулирования через 20 *а*, точного — через 2 *а*; щит на 400 *а* — соответственно через 40 и 4 *а*.

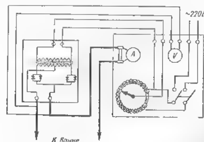


Щит оформлен в виде панели, на которой размещаются контрольно-измерительные приборы и рукоятки управления реостатами. Реостаты точной и грубой регулировки (фиг. 14) выполнены в виде отдельных блоков, что позволяет включать спирали сопротивлений из константановой проволоки одной рукояткой. Габаритные размеры таких щитов 590×590×300 *мм*.



Фиг. 14. Схема реостата точной и грубой регулировки

Щиты второго типа предназначены для плавного (бесступенчатого) регулирования тока изменением напряжения в первичной обмотке понижающего трансформатора выпрямителя

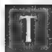


Фиг. 15. Схема электрического питания ванны с плавной регулировкой

(фиг. 15). Первичная обмотка подключается к питающей цепи переменного тока через автотрансформатор. Регулирование тока от нуля до максимума осуществляется одной рукояткой. На панели щита размещены контрольно-измерительные приборы и шкала автотрансформатора. Габаритные размеры щита 490×260×550 *мм*.

Оба типа щитов позволяют при изменении нагрузки ванн легко установить необходимую плотность тока.

## V. СОСТАВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ И РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ



**Требования, предъявляемые к электролитам** Для электрополирования предложены сотни электролитов, различных по составу Такое количество электролитов можно объяснить большим разнообразием предъявляемых к ним требований. Электролит для полирования должен удовлетворять следующим требованиям:

1) иметь хорошую полирующую способность, т е. обеспечивать образование на полируемых поверхностях вязкой пленки с большим электросопротивлением, которая должна задерживаться в углублениях и способствовать интенсивному растворению микровыступов,

2) не разъедать полируемые изделия без прохождения тока,

3) быть химически устойчивым во времени как в процессе эксплуатации, так и в перерывах,

4) иметь широкий диапазон режимов электрополировки,

5) быть безопасным в эксплуатации,

6) состоять из недефицитных и дешевых химикатов

Практически еще нет электролита, который удовлетворял бы всем предъявляемым требованиям

Промышленное применение получило лишь небольшое число электролитов Эти электролиты составлены главным образом на основе фосфорной и серной кислот с добавлением хромового ангидрида, лимонной кислоты или глицерина.

Одним из существенных недостатков электролитов, приготовленных на основе серной и фосфорной кислот, является ограниченный срок их службы. Эти электролиты выходят из строя в результате насыщения их продуктами анодного растворения металлов

**Приготовление электролитов.** Для осуществления технологического процесса, в который входят операции обезжиривания, электрополирования, нейтрализации и т. д., необходимо составление соответствующих электролитов и растворов. Эти растворы приготовляются способами, известными в гальванических цехах

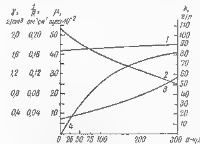
Порядок приготовления электролита для полирования следующий. в отдельном сборнике растворяют в воде необходимое количество хромового ангидрида; полученный раствор после отстаивания сливают в ванну для электрополирования так, чтобы не взмутить осадок нерастворимых соединений. После этого постепенно при перемешивании вливают в ванну расчетное количество ортофосфорной кислоты, а затем серной. Полученную смесь прогревают при 120—125°С до достижения удельного веса 1,7 При прогревании смеси поверхность ее покрывается сначала темной, маслянистого вида, пленкой, а затем на ней образуется тонкий слой желтой пены, которая, распространяясь от бортов



ванны, постепенно закрывает значительную часть зеркала приготовленного электролита

Увеличение температуры выше 125 130°С или слишком продолжительное нагревание может привести к разложению $CrO_3$ на $Cr_2O_3$ и $O_2$. Возникновение этого процесса можно установить по цвету электролита: при значительном содержании $Cr_2O_3$ он приобретает изумрудно-зеленый цвет (от солей трехвалентного хрома); такой электролит не пригоден для полирования

Когда ванны для электрополирования снабжены паровым подогревом и невозможно достижение температуры порядка 120°С, допускается прогревание электролита до 80 -90°С с проработкой его током при анодной плотности 30—40 *а/дм²* (через 1 *л* электролита пропускают 5 6 *а-ч*). После проработки удельный вес электролита должен быть равен 1,7.




Фиг 16. Графики изменения физических свойств сернофосфорнохромового электролита в процессе полирования

*1*—удельный вес γ *2*—электропроводность $\frac{1}{R}$, *3*—вязкость μ *4*—концентрация *k* железа в растворе

В процессе эксплуатации ванны необходимо ежедневно определять удельный вес электролита, периодически производить его анализ на содержание $H_3PO_4$, $H_2SO_4$, $CrO_3$, $Cr_2O_3$ и $Fe_2O_3$ и соответственно корректировать Убыль воды (вследствие выпаривания и уноса) восполняется добавлением ее

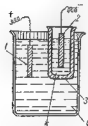
Повышение срока службы электролитов для электрополирования — одна из актуальных проблем прикладной электрохимии.

Сведения о сроках службы электролитов различны. Это объясняется большим разнообразием условий их эксплуатации.

Для электролитического полирования стали широко используются электролиты с применением фосфорной кислоты, серной кислоты и хромового ангидрида Сроки службы таких электролитов определяются изменением физических свойств (фиг. 16) и химического состава их в процессе полирования

В настоящее время считают, что существенным фактором, влияющим на полирующую способность электролита, является накопление в электролите соединений трехвалентного хрома. Количество свободных кислот и необходимое соотношение соединений шестивалентного и трехвалентного хрома могут в той или иной степени поддерживаться постоянным путем непрерывной или периодической регенерации.

Опыты показали, что самым существенным моментом при эксплуатации фосфорнохромового электролита является предотвращение образования соединений трехвалентного хрома. Как известно, восстановление трехвалентного хрома в электролите происходит в прикатодной зоне. Поэтому для устранения влияния соединений трехвалентного хрома прикатодную зону следует изолировать от общего объема ванны.



Фиг. 17. Применение диафрагмы для изоляции прикатодной зоны:

1—анод, 2—катод, 3—диафрагма, 4—электролит в электролизере; 5—электролит прикатодной зоны.

Изоляция прикатодной зоны от общего объема электролита может быть выполнена путем применения диафрагм (фиг. 17).

При работе без диафрагмирования срок службы электролита часто составляет 50—100 *а-ч* на 1 *л*, тогда как при диафрагмировании он может быть доведен до 700 *а-ч* на 1 *л* и выше.

Диафрагма должна обладать следующими свойствами:

1) не пропускать соединений хрома как под током (за счет миграции), так и без тока (за счет диффузии),

2) иметь малое электрическое сопротивление с тем, чтобы падение напряжения на диафрагме, даже при большом токе, не было значительным;

3) не разрушаться и не вступать в химическое взаимодействие с электролитом,

4) изготовляться из электроизоляционного материала, в противном случае она может стать биполярным электродом;

5) обладать механической прочностью, влаго- и кислотоупорностью,

6) быть доступной по стоимости, простой в изготовлении и удобной в эксплуатации,

7) иметь по возможности большую поверхность, чтобы удельная плотность тока на единицу поверхности диафрагмы была возможно меньше.

Диафрагмы обычно выполняются в виде прямоугольных или цилиндрических глубоких сосудов, в которые помещаются катоды. Католитом может служить электрополировочный электролит или другой проводящий ток раствор фосфорной или серной кислоты. Обычно материалом для изготовления диафрагм служат неглазированная керамика или фарфор, графит, асбоцемент,



стеклянная вата или стеклянная ткань и т. д. Наилучшим материалом для изготовления диафрагм является смесь красной и шамотной глины (30% шамотной глины) и песка. Изготовление производится при слабом обжиге. Размеры диафрагмы зависят от величины ванны. Для снижения электрического сопротивления стенки диафрагмы следует делать как можно тоньше.

Диафрагмы применяют как в период электрополировки, так и при регенерации электролитов, что предотвращает накопление трехвалентного хрома в электролите.

Таким образом, с применением диафрагм отпадает необходимость регенерации электролита. Если же работа в ванне электрополирования велась без применения диафрагмы и в растворе накопились излишки соединения трехвалентного хрома, электролит следует ставить на регенерацию с целью окисления соединений хрома и перевода их в шестивалентные соединения. Окисление трехвалентного хрома в шестивалентный осуществляется в прианодной зоне, следовательно, регенерацию электролита следует проводить так, чтобы размер площади поверхности анода был бы значительно (в 5—6 раз) больше площади катода.

Полирующие свойства электролита после регенерации определяются после анализа его состава и опытным путем на образцах.

**Влияние режима электрополирования на съем металла.** Каждая конфигурация детали и каждая марка стали требуют индивидуального подбора режима электрополирования. При подборе режима полирования следует учитывать назначение электрополирования, конфигурацию и материал изделия или детали. В разделе VI настоящей брошюры приведены уточненные режимы и методика электрополирования арматуры трубопроводов, инструмента и шестерен.

Особое внимание следует обратить на точное соблюдение режима электрополирования при размерном полировании.

Как известно, при электрополировании металлических изделий происходит удаление (съем) части металла и изменение размеров обрабатываемого изделия.

Количество металла, удаляемого анодным растворением, а следовательно, и изменение размеров полируемого изделия зависят от:

а) плотности тока,
б) длительности электролиза,
в) температуры электролита,
г) состава электролита,
д) интенсивности перемешивания,
е) состава и состояния металла,
ж) положения изделия в ванне.

Для каждого изделия необходимо установление абсолютных значений каждой из перечисленных характеристик путем проведения корректирующих проб.

Корректирующей пробой называется опытное полирование двух-трех модельных образцов, изготовленных из того же металла, что

и полируемое изделие, либо опытное полирование двух-трех натурных деталей из партии в рабочих условиях при контроле всех параметров процесса

При выполнении корректирующей пробы производят точное измерение всех основных размеров образца или изделия до и после полирования и по полученной разности устанавливают фактический съем металла в единицу времени по формуле

$$C_ф = \frac{P_н - P_к}{D_п},$$

где $C_ф$ — фактический съем металла;
$P_н$ — начальный размер,
$P_к$ — конечный размер;
$D_п$ — продолжительность полирования

**Влияние электрохимического полирования на свойства металла.** Статические характеристики — предел текучести, предел прочности, относительное удлинение, относительное сужение зависящие в основном от структуры металла при, электрополировании практически не изменяются

Электрохимическое полирование, сопровождающееся растворением поверхностного слоя металла, оказывает влияние на некоторые свойства поверхности. Преимущественное растворение микрогребешков приводит к повышению чистоты поверхности металла. Если начальная чистота поверхности не ниже 4—5 класса (по ГОСТ 2789—59), электрополированием можно повысить ее на один-два класса. При этом понижается не только высота микронеровностей, но и меняется характер микрорельефа. Острые вершины гребешков, образовавшиеся при резании металла в процессе электрополирования уменьшаются по высоте и приобретают округлую форму. Очевидно, что при сопряжении таких электрополированных поверхностей величина фактической опорной поверхности их возрастает, что приводит к снижению удельного давления и может оказать положительное влияние при работе деталей в условиях трения

Для исследования влияния электрополирования на фрикционные свойства стали при работе ее в сопряжении с чугуном были проведены испытания образцов. Сравнивались механически шлифованные, механически полированные и электрополированные образцы. Чистота поверхности шлифованных образцов соответствовала 9-му классу, механически полированных и электрополированных 12-му классу (по ГОСТ 2789—59) Влияние электрополирования на фрикционные свойства металла видно из графиков (фиг. 18). Электрополирование одной из сопряженных поверхностей стали приводит к снижению коэффициента трения по сравнению с механическим полированием в 2,5 раза, а электрополирование обеих сопряженных поверхностей — более чем в 3 раза. Коэффициент трения сопряженной пары «сталь—чугун» в случае электрополирования стали снижается в 8—10 раз. Электрополирование способствует быстрой стабилизации коэффициента тре-

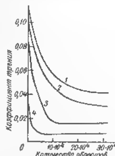


ния, уменьшает время прирабатываемости трущихся поверхностей в 5—6 раз. Кроме того, электрополирование в 8—10 раз повышает и коррозионную стойкость металла

**Электрополирование стали.** Для электролитического полирования стали было предложено большое количество электролитов, но только немногие из них получили промышленное применение.

Некоторые сорта нержавеющей стали можно полировать электролитическим способом в одной серной или в одной фосфорной кислоте, но для этого требуется плотность тока примерно 250 *а/дм²*

Составление электролитов из нескольких кислот оказывает положительное влияние на полирование. Многокислотные составы и различные добавки позволяют сократить время электролиза, понизить плотность тока и температуру, при этом расширяется количество марок стали, поддающихся эффективному электрополированию. Для электрополирования углеродистой и низколегированной стали широко используется в промышленности электролит со следующим составом (в весовых процентах)




Фиг 18. Влияние электрополирования на фрикционные свойства металла (пары сталь — сталь)

1—механическое шлифование 2—механическое полирование, 3 механическое полирование и электрополирование, 4 электрополирование

| | |
|---|---|
| Ортофосфорная кислота | 65—70 |
| Серная кислота | 12—15 |
| Хромовый ангидрид | 6—8 |
| Вода | 12—15 |

Режим электрополирования

| | |
|---|---|
| Плотность тока (анодная) | 35—50 *а/дм²* |
| Температура электролита | 65—75° С |
| Продолжительность полирования | 5—10 мин |

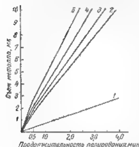
Указанный электролит чаще всего используется в промышленности для углеродистых и низколегированных сталей. Скорость растворения металла при этом в среднем равна 0,005—0,006 *мм/мин* (фиг. 19). Изменения физических свойств электролита показаны на фиг. 20

Для высоколегированных нержавеющих сталей рекомендуется электролит следующего состава (в весовых процентах)

| | |
|---|---|
| Ортофосфорная кислота | 40—45 |
| Серная кислота | 37—34 |
| Хромовый ангидрид | 3—4 |
| Вода | 20—17 |

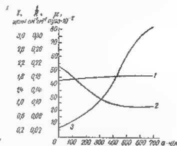
Режим электрополирования

Плотность тока (анодная) . . . . . . . . . . . 40—70 $a/дм^2$
Температура электролита . . . . . . . . . . . 70—80° C
Продолжительность полирования . . . . . . 5—15 мин.




Фиг 19. Скорость растворения металла в фосфорнохромовом электролите при различных плотностях тока

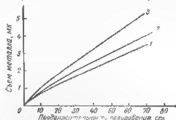
1—3 $a/дм^2$; 2—30 $a/дм^2$; 3—40 $a/дм^2$, 4—50 $a/дм^2$; 5—60 $a/дм^2$.




Фиг 20. Графики изменения физических свойств сернофосфорнохромового электролита:

1—удельный вес γ, 2—электропроводность $\frac{1}{R}$, 3—вязкость μ.

Скорость растворения металла в электролите показана на графике (фиг. 21), а физические свойства электролита на фиг 16.




Фиг 21 Скорость растворения металла в фосфорносернохромовом элекролите, содержащем 40—45% $H_3PO_4$, 34—37% $H_2SO_4$, 3—4% $CrO_3$, 17—20% воды при различных плотностях тока

1—30 $a/дм^2$; 2—40 $a/дм^2$; 3—50 $a/дм^2$.

Для электрополирования жароупорных сталей марок ЭИ432, ЭЯ1Т, ЭИ448 и т. д. применяют электролит с добавкой глицерина



Состав электролита (в весовых процентах)

Ортофосфорная кислота . . . . . . . . . . . . . 65
Серная кислота . . . . . . . . . . . . . . . . 15
Хромовый ангидрид . . . . . . . . . . . . . . 5
Глицерин . . . . . . . . . . . . . . . . . . 12
Вода . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 3

Режим электрополирования

Плотность тока (анодная) . . . . . . . . 5—25 $a/дм^2$
Температура электролита . . . . . . . . 40—70° C
Продолжительность полирования . . . . . 3—5 мин.

Электролит для электрополирования нержавеющей стали, в состав которого также входит глицерин, имеет следующий состав (в весовых процентах):

Серная кислота . . . . . . . . . . . . . . . 50
Глицерин . . . . . . . . . . . . . . . . . . 40
Вода . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 10

Поверхность электрополирования в этом электролите приобретает яркий блеск. Высота сглаженных микронеровностей достигает 50 *мк*.

Однако эксплуатация электролита, содержащего глицерин, не вполне удобна, так как при электрополировании происходит сильный разогрев раствора, вспенивание его и испарение глицерина.

Весьма интересным по полирующим свойствам является двухкомпонентный фосфорнохромовый электролит, составленный из ортофосфорной кислоты с добавлением хромового ангидрида В электролите хорошо полируются как нержавеющие стали, так и углеродистые, малолегированные, белые, серые и ковкие чугуны.

Промышленное применение нашел также так называемый «универсальный» электролит, который составляется смешением 74% фосфорной кислоты с удельным весом 1,6, 18% серной кислоты с удельным весом 1,84 и 8% хромового ангидрида Температура электролита при электрополировании для всех металлов поддерживается в пределах 60—80°. Режимы электрополирования приведены в табл. 5

Таблица 5

**Режимы электрополирования в универсальном электролите**

| Металлы | Плотность тока в $a/дм^2$ | Продолжительность полирования в мин |
|---|---|---|
| Стали . . . . . . . . . . . . . | 30—40 | 1—3 |
| Никелевые покрытия . . . . . . | 25—35 | 0,5—1,5 |
| Алюминий и дюралюминий Д1, Д6 и Д16 . . . . . | 20—25 | [illegible] |

Таблица 6

**Виды брака и меры его предупреждения**

| Виды брака | Причины возникновения | Меры предупреждения |
|---|---|---|
| Травление поверхности, недополировка поверхности, матовые белые пятна | Отступление от режима полирования, повышение или понижение плотности тока, температуры, времени полирования | Точное соблюдение режима полирования |
| Белые пятна, растравливание поверхности | Химическое действие электролита в результате замедленной и недостаточно тщательной промывки изделий после электрополирования | Очень быстрое и тщательное проведение промывочных операций |
| Белые пятна, темные налеты | Повышение температуры выше 100° С | Охлаждение электролита до оптимальной температуры и соблюдение температуры в процессе электрополирования |
| Точечная коррозия и наличие полос | Пузырьки газа в результате медленного газовыделения на аноде прилипают к поверхности, образуя точечную коррозию. Полосы получаются в результате перемещения пузырька газа по поверхности | Повышение анодной плотности тока или перемешивание электролита, повышение температуры электролита |
| Местный „прижог" на поверхности изделий | Короткое замыкание изделий катодом | Устранение короткого замыкания |
| Точечная коррозия на электрополированной поверхности | Повышенная плотность тока при электрополировании, характеризующаяся выделением кислорода на изделиях | Установление напряжения и силы тока в ванне, электрополирование в соответствии с технологическим процессом |

Нарушение режима электрополирования или неправильный состав электролита очень часто приводят к недоброкачественной полировке

В табл 6 приведены наиболее часто возникающие виды брака причины возникновения и меры его предупреждения

Для крепления деталей из стали при электрополировании не рекомендуется использовать медные подвески, так как растворение их в электролитах приводит к выделению контактной меди на поверхности стали



Катодами при электрополировании стали могут служить свинцовые листы или пластины из нержавеющей стали При электрополировании в фосфорнохромовом электролите катоды должны изготовляться только из нержавеющей стали.

В сернофосфорнохромовых электролитах, кроме сталей, хорошо полируются алюминий и его сплавы

Для электрополирования нержавеющей стали хорошо зарекомендовали себя электролиты, составленные на основе серной кислоты с добавлением лимонной

Состав электролита (в весовых процентах)

| | |
|---|---|
| Лимонная кислота | 50—70 |
| Серная кислота | 15—20 |
| Вода | 25—30 |

Режим электрополирования

| | |
|---|---|
| Плотность тока (анодная) | 10—20 $a/дм^2$ |
| Температура электролита | 45—125° С |
| Продолжительность электрополирования | 5—10 мин |

Электролит, составленный из смеси серной и лимонной кислот, устойчив в эксплуатации (это его главное положительное свойство), допускает большие отклонения от режима электрополирования Корректировка его проста, сводится лишь к добавлению в раствор серной или лимонной кислоты. Однако ввиду дефицитности лимонной кислоты электролит широкого промышленного применения не нашел

**Электрополирование меди и медных сплавов.** Электролитическое полирование меди осуществляется в 70-процентном водном растворе ортофосфорной кислоты (уд. вес 1,55)

Для приобретения полирующих свойств электролит подвергается проработке.

Проработку свежеприготовленного электролита ведут с таким расчетом, чтобы через каждый литр электролита прошло 5—6 *а-ч* электричества Во время проработки в электролите растворяется медь и электролит приобретает зеленоватый оттенок

В процессе полирования медных изделий так же, как и в процессе проработки, катодами служат пластины из нержавеющей стали или меди Анодами при проработке электролита являются медные пластины

В процессе электрополирования меди в электролите накапливается губчатая медь, от которой следует освобождаться декантированием электролита

Рабочий диапазон электрополирования меди и латуни по плотности тока весьма широк, так, например, медь можно полировать при плотности тока от 3 до 20—30 $а/дм^2$, соответственно продолжительность электрополирования изменяется от 2 до 15 мин.

Изделия сферической формы значительно лучше поддаются электрополированию, чем плоские

В процессе электрополирования электролит разогревается. Повышение температуры электролита свыше 32—35°С резко снижает качество электрополирования. Во избежание разогрева электролита рекомендуется поддерживать объемную плотность тока до 1,0 *а/л* или снабдить ванну змеевиком для охлаждения

Подвески для крепления медных деталей следует изготовлять из меди или латуни. Стальные подвески для этой цели недопустимы, так как при электролизе они оставляют темные пятна на поверхности деталей

**Электрополирование алюминия.** Электролитическое полирование изделий из алюминия и его сплавов получило большое распространение, особенно для изделий, подлежащих оксидированию. Поверхность изделия, отполированная электрохимическим способом, после оксидирования приобретает равномерную, слегка блестящую плотную пленку

Электрополирование изделий из алюминия и его сплавов осуществляется в электролите, предназначенном для электрополирования стали

Режим электрополирования алюминия

| | |
|---|---|
| Плотность тока | 20—30 *а/дм²* |
| Температура электролита | 75—80°С |
| Продолжительность | 4—7 мин |

Надо отметить, что в процессе электрополировки алюминия или алюминиевых сплавов установленная плотность тока поддерживается только в первые минуты Затем по мере образования окисной пленки на поверхности алюминиевого изделия ток резко падает, напряжение повышается. Несмотря на это, процесс следует продолжать установленное время — 4—7 мин

В целях получения большего блеска на поверхности алюминия рекомендуется разрушать окисную пленку, образующуюся в процессе электрополирования путем кратковременного прерывания тока или весьма кратковременного его реверсирования

При электрополировании алюминия электролиты быстро выходят из строя (стареют) Процесс старения вызван, во-первых, восстановлением хромового ангидрида в окись хрома и, во-вторых, накоплением в электролите алюминия. Основное значение имеет последний фактор. Накопление алюминия в электролите в количестве 25—30 *г/л* значительно снижает качество полирования Поэтому в промышленности опробованы также некоторые электролиты с другим составом, в том числе электролиты, в которые входит этиленгликоль. Ниже приводятся составы двух электролитов с содержанием этиленгликоля

1. Состав электролита (в *мл*)

| | |
|---|---|
| Фосфорная кислота (уд. вес 1,7) | 1 000 |
| Серная кислота (уд. вес 1,84) | 160 |
| Этиленгликоль | 150 |
| Вода | 100 |



Поверхность, электрополированная в этом электролите, приобретает очень хороший блеск, без каких-либо дефектов, если электрополирование сопровождается движением анодов (деталей) При неподвижных анодах поверхность растравливается

Режим электрополирования

| | |
|---|---|
| Плотность тока | 6—12 *а/дм²* |
| Температура электролита | 80—90°С |
| Продолжительность полирования | 8—15 мин. |

При длительной эксплуатации электролит приобретает повышенную вязкость, что отрицательно сказывается на качестве полирования (образуется продольная полосчатость).

2. Состав электролита (в *мл*)

| | |
|---|---|
| Фосфорная кислота (уд. вес 1,53) | 1000 |
| Этиленгликоль | 200—500 |

Режим электрополирования.

| | |
|---|---|
| Плотность тока | 12—15 *а/дм²* |
| Температура электролита | 85—95° С |
| Продолжительность полирования | 4—6 мин |

В состав второго электролита не входит серная кислота. Для получения блестящей поверхности процесс электрополирования, как и в первом электролите, должен сопровождаться движением анодов (деталей). Материал катодов — нержавеющая сталь.

Для электрополирования чистого алюминия содержание этиленгликоля необходимо снизить до 200—300 *мл;* для сплава алюминия с магнием (АМг-4) количество этиленгликоля, наоборот, следует увеличить до 400 *мл*

В указанных электролитах возможно регулирование растворяющего действия электролита (съем металла) путем изменения содержания этиленгликоля, так как скорость растворения алюминия в электролите линейно уменьшается с увеличением количества этиленгликоля Съем металла при электрополировании алюминия составляет в среднем 9—10 *мк.* Возвратно-поступательное движение анодной штанги производится с амплитудой не менее 50 *мм.* Число качаний в минуту — 80—120. Подвеска с деталями должна быть жестко закреплена на штанге и не смещаться во время движения

**Электрополирование никелевого покрытия.** Гальванические никелевые покрытия из обычных никелевых электролитов осаждаются матовыми и приобретают блеск только после полировки

Механическое полирование никелированных деталей производится на полировальных станках при помощи вращающихся матерчатых кругов, на которые наносится специальная полировальная паста. Выполнение этой операции связано с затратой ручного труда, и стоимость ее значительно превышает стоимость гальванических покрытий.

В процессе механического полирования гальванических покрытий снимается большая толщина слоя покрытия и, следовательно, снижаются защитные свойства этого слоя. Во многих случаях

механическое полирование приводит к снятию никеля с выступов. Кроме того, поверхность деталей загрязняется полировальными пастами, и при необходимости последующего гальванопокрытия требуется очищение ее (обезжиривание, демонтаж повторный монтаж на приспособлениях). Для механического полирования деталей, имеющих сложную конфигурацию, нужны специальные приспособления, так как их полирование обычными путями весьма затруднительно, а в некоторых случаях совершенно невозможно

Электролитическое полирование никелевых покрытий, устраняя указанные недостатки механического полирования, дает возможность получить высококачественную полированную поверхность.

Электролитом для полирования никелевых покрытий служит серная кислота (уд. вес 1,60) Катодами являются пластины из листового свинца

В отличие от электролитического полирования меди процесс электрополирования никеля сопровождается обильным выделением кислорода на аноде. Катодный процесс при этом также отличается от катодного процесса при электрополировании меди в силу различия электрохимических свойств обоих металлов. Катодный процесс при полировании меди в основном заключается в выделении на катоде губчатой меди, в случае полирования никеля при более электроотрицательном металле на катоде происходит лишь выделение газообразного водорода

Для электролитического полирования гальванических покрытий большое значение имеет величина съема металла в процессе электролиза. При полировании гальванопокрытий необходимо сочетание минимального и равномерного съема металла с получением максимально блестящей поверхности изделий Надо отметить, что при электрополировании как никелевого, так и других покрытий съем металла не находится в прямолинейной зависимости от продолжительности электрополирования Скорость растворения никелевого слоя имеет максимальное значение в начале процесса и резко снижается через 10 15 сек

Работами в области электрополирования, проведенными Казанским филиалом Академии наук, установлено, что для плотности тока 30 $а/дм^2$ скорость растворения никелевого покрытия приближается к значению 0,047 *мк* в 1 сек ; при плотности тока 40 $а/дм^2$ снимается 0,053 *мк* в 1 сек., а при 50 $а/дм^2$ 0,07 *мк* в 1 сек.

Но съем металла не определяет качества электролитического полирования. Основным фактором, определяющим смысл электрополирования, является блеск. Блеск никелевого покрытия в процессе электролитического полирования возрастает очень быстро в продолжении первых 10—15 сек. обработки, в то время как в последующие 30 100 сек. его рост значительно замедляется.

Схема технологического процесса электрополирования никелевых покрытий аналогична схеме процесса электрополирования сталей, меди, алюминия и других металлов или металлических покрытий



Для приготовления электролита в рабочую ванну заливается вода в таком количестве, чтобы при последующем добавлении концентрированной серной кислоты получить водный раствор серной кислоты концентрации 58—69% (уд. вес 1,60) Контроль электролита сводится к измерению плотности последнего при помощи ареометра и периодическому определению концентрации кислоты методом титрования. Корректирование заключается в добавлении концентрированной серной кислоты

Накопление растворенных солей никеля (до 70 *г/л*) в электролите ухудшает его электрополировочные свойства При этом поверхность никелевого покрытия становится несколько протравленной, растворение слоя происходит неравномерно

Такой электролит, непригодный для электрополирования, может быть использован для других нужд гальванического цеха (травления черных металлов и т д.)

Электролитическому полированию можно подвергать все никелевые покрытия, полученные из стандартных никелировочных ванн.

Электрополированию поддаются как покрытия, полученные из обычных никелировочных ванн, так и покрытия, полученные из никелировочных ванн, процесс покрытия которых интенсифицирован ультразвуком

Состав электролита для никелирования (в *г/л*):

| | |
|---|---|
| Сернокислый никель | 2[illegible]—250 |
| Борная кислота | 25—30 |
| Хлористый калий | 5 |

Режим никелирования

| | |
|---|---|
| Плотность тока (катодная) | 1—1,[illegible] $а/дм^2$ |
| Температура электролита | 18—2[illegible] °С |
| pH | 4,7—5,1 |
| Продолжительность осаждения | 45—60 мин |
| Толщина слоя | 12 *мк* |

Этот же электролит может быть использован с применением ультразвука для интенсификации процесса по следующему режиму:

| | |
|---|---|
| Плотность тока | 10—12 $а/дм^2$ |
| Температура электролита | 37—45°С |
| pH | 4,7—5,2 |
| Продолжительность осаждения | 7—10 мин. |
| Толщина слоя | 10—15 *мк* |

После нанесения никелевого покрытия изделия промываются в холодной проточной воде

В целях получения равномерного электрополирования покрытий изделия сложной формы после промывки в холодной воде погружают на несколько секунд в раствор серной кислоты (уд вес 1,6—1,7). Этой операцией предотвращается также разбавление электролита водой, вносимой изделиями Затем изделия помещают в ванну электрополирования. Электролитом является

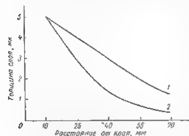
раствор серной кислоты (уд. вес 1,57—1,62, концентрация 66,09—70,42%)

Режим электрополирования:

| | |
|---|---|
| Плотность тока (анодная) | 30—40 $a/дм^2$ |
| Температура электролита | 40—60°С |
| Продолжительность полирования | 15—50 сек. |
| Напряжение | 12—18 *в* |
| Величина съема | 2—3 *мк* |

По окончании процесса электрополирования изделия переносят в промывные ванны с холодной проточной водой и тщательно отмывают от серной кислоты

Иногда в результате электрополирования на отдельных участках поверхности изделия и прежде всего на внутренних или углубленных поверхностях обнажается основной металл. Для устранения этого вида брака необходимо нанесение достаточного слоя никеля




**Фиг 22.** Кривые рассеивающей способности электролита для никелирования и электролита для электрополирования никеля

*1*—кривая анодного растворения никеля при электролитическом полировании; *2*—кривая осаждения никеля на поверхности углового катода.

Осаждение или растворение слоя никеля на выпуклых поверхностях зависит от различной рассеивающей способности электролитов. По материалам Казанского филиала Академии наук, сопоставление рассеивающей способности электролита для никелирования и электролита для электрополирования показывает, что рассеивающая способность электролита для электрополирования выше рассеивающей способности электролита для никелирования (фиг. 22).

Другим видом брака является образование растравленной поверхности. Этот вид брака указывает на наличие посторонних включений в никелевом осадке. Для предотвращения этого брака следует электролит для никелирования отфильтровать или дать ему отстояться

## VI. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ

овременная техника располагает рядом способов тонкой отделки и полирования поверхностей металлов— от примитивных ручных до сложных механических. Все эти способы обладают недостатками, к которым относятся повышенная трудоемкость, зависимость продолжительности полирования от площади изделия, затруднительность обработки криволинейных поверхностей (канавки сверл, разверток, фрез и т. д.), изменение структуры металла из-за разогрева при обработке, образование на обрабатываемой поверхности деформированного слоя и необходимость высокой квалификации исполнителей. Наличие деформированного поверхностного слоя инструмента облегчает развитие коррозии и способствует быстрому разогреву его во время работы



Электролитическое полирование инструмента получило распространение в промышленности, так как электрополированная поверхность более коррозионноустойчива, чем механически полированная. Кроме того, длительность электрополирования не зависит от размера обрабатываемого изделия и его формы, а на электрополированной поверхности отсутствует деформированный слой. Более того, образующийся при шлифовании инструмента отпущенный и деформированный слой при электрополировании снимается, что также повышает стойкость инструмента. Обработка электрополированием особенно эффективна для инструмента, изготовленного из углеродистой инструментальной стали марки У9 и хромовой стали марки ХЛ.

**Электрополирование режущего инструмента.** Повышение стойкости режущего инструмента возможно различными методами, в частности, полированием. Полированная поверхность режущей части инструмента способствует сходу стружки в процессе резания, уменьшая разогрев инструмента и обусловливая повышение долговечности и надежности его работы.

Принципиально технология электрополирования инструмента не отличается от технологии электрополирования других видов изделий, например труб, деталей арматуры, изделий широкого потребления и т. д. Но полирование каждого вида инструмента имеет свои особенности

**Электрополирование сверл.** Процесс осуществляется в два приема. Вначале производится электрополирование канавки сверла, а затем доводка режущей части сверла — ленточки.

Электрополирование канавки сверла производится после термической и лезвийной обработки с целью сглаживания ее. Сглаживание канавки сверл обеспечивает более легкий сход стружки при сверлении, значительно меньший разогрев сверла и тем самым повышает стойкость сверла в эксплуатации

В табл. 7 указаны режимы электрополирования канавки сверл, изготовленных из часто применяемых марок сталей.

Электрополирование канавки сверла проводится перед механическим шлифованием. Эта операция осуществляется в ванне для электрополирования сверл без дополнительных приспособлений, обеспечивающих точное соблюдение размеров. Ванна для электрополирования канавки сверла снабжена только приспособлением для надежного крепления сверл и двумя боковыми катодами для подвода тока. При электрополировании канавки сверл не требуется точного соблюдения размеров и поэтому его можно проводить в

широких диапазонах плотности тока, температуры электролита и времени полирования

Таблица 7

**Режимы полирования канавки сверла**

| Материал сверла | Режим электрополирования | | | Снижение размеров по диаметру в мм |
|---|---|---|---|---|
| | плотность тока в а/дм² | температура электролита в °С | продолжительность в мин | |
| ЭИ264 | 50—60 | 70—90 | 7—8 | 0,14—0,2 |
| ХЛ | 45—50 | 70—90 | 5—6 | 0,1—0,12 |
| У9 | 40—50 | 70—80 | 5—7 | 0,1—0,13 |

Доводка электрополированием — последняя операция, которая производится после всех механических операций и термической обработки. После доводки инструмент полностью готов к работе

Доводочным электрополированием снимается деформированный поверхностный слой, образованный при механической обработке

В табл. 8 указаны режимы доводки электрополированием сверл диаметром 5—7 *мм*.

Таблица 8

**Режимы доводки сверл электрополированием**

| Материал сверла | Режим доводки | | | Снижение размеров по диаметру в мм |
|---|---|---|---|---|
| | плотность тока в а/дм² | температура электролита в °С | продолжительность в сек | |
| ЭИ262 | 50 | 80—82 | 30—45 | 0,01—0,02 |
| ХП | 45 | 80—82 | 20—30 | 0,01—0,013 |
| У9 | 45 | 80—82 | 20—30 | 0,01—0,012 |

При доводке сверл электрополированием, кроме размера сверла, необходимо соблюдение и его геометрии. Сохранение геометрии сверла зависит от расположения катода Так, например, сверла, диаметр которых превышает 5—6 *мм*, обрабатывают в электрополировочной ванне с двумя катодами в виде узких полосок, расположенных вблизи зеркала ванны (фиг 23, *а*) Сверла, размер которых меньше 5 *мм*, полируются с индивидуальными катодами (фиг 23, *б*) При этом расстояние между катодом и сверлом *а* должно быть в два раза меньше длины сверла *b* и ширина катода приблизительно должна быть равна одному или полутора диаметрам сверла

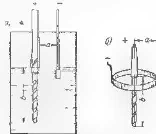
При соблюдении режима доводочного электрополирования, размера и расстояния катодов от сверл можно обеспечить качество доводочного электрополирования, размеры и геометрию сверл

Аналогично полируют развертки, метчики и другой режущий инструмент



**Электрополирование фрез.** При отсутствии точных размеров по диаметру электрополирование фрез не вызывает затруднений. Необходимо лишь соблюдение его режима в целях обеспечения качества полируемой поверхности

Фрезы завешивают в ванну с таким расчетом, чтобы расстояние между ними и катодами было не менее 50 *мм*, а расстояние между фрезами было бы не менее диаметра фрезы Это условие необходимо для равномерного съема металла по периферии фрезы Если электролит, в котором полируются фрезы или другой инструмент, имеет удельный вес свыше 1,75, то во время электрополирования инструмент следует периодически поворачивать на 90° Вращением инструмента так же достигается равномерный съем металла по периферии инструмента



Фиг. 23. Расположение катода при электрополировании сверл
*а*—подвеска и катод для электрополирования нескольких сверл, *б* -индивидуальный катод для мелких сверл.

Режимы электрополирования некоторых фрез приведены в табл 9.

**Электрополирование зубьев шестерен.** Зубья шестерен силовых цилиндрических и

Таблица 9

**Режимы электрополирования фрез**

| Наименование инструмента | Режим электрополирования | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Материал | плотность тока в а/дм² | температура электролита в °С | выдержка в мин |
| Фрезы цилиндрические . . | РФ1 | 45—60 | 70—90 | 6—8 |
| Фрезы дисковые . . . . | ЭИ262 | 50—60 | 70—85 | 5—6 |

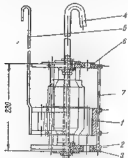
конических передач испытывают высокие переменные изгибающие и контактные напряжения. Поэтому качество поверхностного слоя профилей зубьев, особенно цементированных и шлифованных, после закалки имеет исключительное значение

При механическом шлифовании зубьев шестерен возможны повреждения поверхностного слоя (шлифовочные прижоги, остаточные напряжения), которые снижают их сопротивляемость переменным рабочим нагрузкам и часто приводят к появлению трещин, отслаиванию металла и поломке

В промышленности разработана и применяется чистовая отделка зубьев шестерен электрополированием. Такая обработка при-

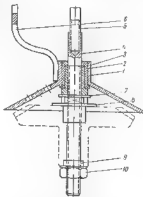
дает им наибольшую прочность на изгиб в местах соединения (контакта).

Приспособления для электрополирования зубьев цилиндрических и конических шестерен показаны на фиг. 24, 25. В обоих случаях анодом является шестерня, катодом — втулка из нержа-




Фиг. 24. Приспособление для электрополирования цилиндрической шестерни:

*1*—катод, *2*—кольцо; *3, 6*—прокладки *4, 5*—штанги *7*—стойка




Фиг. 25. Приспособление для электрополирования конической шестерни

*1*—катод, *2*—втулка *3*—втулка гайки, *4*—винт, *5, 6*—штанги, *7*—гайка, *8, 9*—шайбы, *10*—гайка

веющей стали марки 1Х18Н9Г. Снятие металла тем интенсивнее, чем меньше расстояние катода от контура зуба. Увеличивая или уменьшая расстояние между контуром зуба шестерни *1* (фиг. 26, *а*) и катодом, можно при одних и тех же плотностях тока, продолжительности электрополирования и прочих равных условиях изменять профиль зуба




Фиг 26. Регулирование съема металла по поверхности профиля зуба

*1*—шестерня; *2*—катод; *L* расстояние между шестерней и катодом, *А*—участок катода.

Концентрация линий тока на краях зубьев позволяет вести закругление кромок, которое можно усилить путем удлинения катода или придания его краям конусной формы (фиг 26,б) Закругление кромок может быть симметричным или односторонним Это определяется длиной и формой катода

Длина катода при электрополировании шестерен выбирается равной ширине зуба, а расстояние между ними и окружностью выступов зубьев равно 0,8 высоты зуба



В тех случаях, когда закругление нежелательно, длину катода делают короче ширины зуба.

Для электрополирования шестерен применяется электролит (уд. вес 1,6—1,7) следующего состава (в весовых процентах):

| | |
|---|---|
| Серная кислота (уд. вес 1,84) | 50 |
| Фосфорная кислота (уд. вес 1,54) | 50 |

Режим полирования:

| | |
|---|---|
| Плотность тока (анодная) | 200 *а/дм²* |
| Температура ванны | 18—26° С |
| Продолжительность полирования | 3—4 мин. |

В целях улучшения чистоты поверхности после электрополирования профили шестерен подвергаются дополнительной обработке — осветлению

Осветление производят с тем же приспособлением в электролите следующего состава (в весовых процентах)

| | |
|---|---|
| Ортофосфорная кислота | 78—80 |
| Хромовый ангидрид | 9—12 |
| Вода | 9—12 |
| Железо | 1—3 |

Режим осветления

| | |
|---|---|
| Плотность тока (анодная) | 15—25 *а/дм²* |
| Температура раствора | 72—85° С |
| Продолжительность обработки | 1,5—2 мин. |

После осветления шестерен осуществляют все последующие операции технологического процесса электрополирования, а именно, демонтаж, промывку, нейтрализацию, сушку и консервацию тем или другим составом

Для отработки режимов, обеспечивающих нужные размеры фланка, проводилось опытное электрополирование цилиндрических шестерен, имеющих модуль $m=5$, число зубьев $z=20$; ширину зуба 66 *мм*.

На фиг 27 показана зависимость глубины *В* и высоты *Ф* фланка от продолжительности электрополирования в ванне при разных значениях отношения

$$K = \frac{a}{H},$$

где $a$ — расстояние от катода до вершины зуба в *мм*
$H$ — высота зуба в *мм*.

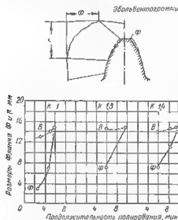
Как видно из фиг. 27, с увеличением времени электрополирования глубина фланка возрастает более резко, чем его высота

На фиг. 28 показана эвольвентограмма шлифованного и электрополированного зуба цилиндрической шестерни и эвольвентограмма зуба той же шестерни, обработанной только механическим способом. У электрополированного зуба имеет место постепенный

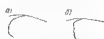
переход от фланка к основному профилю, благоприятно влияющий на плавность зацепления.

Типичный отпечаток контакта электрополированного зуба показан на фиг. 29

Иногда электрополирование шестерен применяется для исправления контакта профилей зуба, вызванного короблением при термической обработке.




Фиг 27 Зависимость коэффициента $\kappa$ от продолжительности электрополирования.



Фиг 28. Эвольвентограмма фланкированного профиля зуба цилиндрической шестерни

*а*-после электрополирования, *б*—после шлифования фланка



Фиг 29. Отпечаток контакта зацепления конических шестерен на краску

*а*—после обычной обработки, *б*—при фланкировании и закруглении кромок путем электрополирования.

Положительное влияние электрополирование поверхности оказывает на предел выносливости и усталостную прочность металла (фиг. 30).

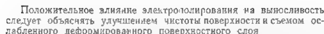
В табл. 10 приведены пределы выносливости электрополированных образцов и образцов без электрополирования

Таблица 10

**Пределы выносливости электрополированных образцов и образцов без электрополирования**

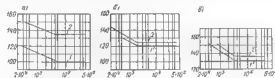
| Вариант обработки | Пределы выносливости при пульсирующем цикле в $кГ/мм^2$ | |
|---|---|---|
| | без электрополирования | с электрополированием |
| Нешлифованные | 109 | 135 |
| Шлифованные | 120 | 125 |





Положительное влияние электрополирования на выносливость следует объяснять улучшением чистоты поверхности и съемом ослабленного деформированного поверхностного слоя

Кроме улучшения качества поверхностного слоя, электрополирование дает возможность выявить как дефекты самого металла, так и дефекты, возникающие в результате механической обработки. Так, например, при шлифовании цементированных и термически обработанных шестерен возникают прижоги, которые обнаруживаются путем обработки поверхности шестерен травлением. Электрополирование поверхности позволяет выявить прижоги в тех случаях, когда они не вскрываются травлением после шлифования; кроме того, при помощи электрополирования удаляют поврежденный слой.



Фиг 30. Кривые усталости цементированных образцов из стали 12Х2Н4А при различных способах чистовой обработки после термической обработки

*а*: *1*—нешлифованные; *2*—нешлифованные, но электрополированные; *б*: *1*—шлифованные; *2*—шлифованные и электрополированные; *в*: *1*—шлифованные и обдутые дробью; *2*—шлифованные, обдутые дробью и электрополированные.

Электрополирование можно применять для всех видов шестерен как с прямым, так и с шевронным зубом, цилиндрических или конических, а также более сложных по профилю эвольвентных и шлицевых соединений.

Применение электрополирования при окончательной доводке зубьев высотой 0,5–1,0 *мм* для различных видов шестерен, храповых и зубчатых колес обеспечивает

1) удаление мелких заусенцев с зубьев шестерен и колес;
2) скругление кромок вершины зуба храповых колес по радиусу на 0,05—0,1 *мм*,
3) удаление неровностей на плоскостных поверхностях колес;
4) уменьшение коэффициента трения зубчатых пар (из стали ЭИ474, стали 35 и др.) по сравнению со шлифованными парами в 5,5 раза и по сравнению с полированными механическим способом в 4 раза,
5) повышение коррозионной стойкости.

**Электрополирование деталей сложной конфигурации.** В целях повышения коррозионной стойкости электрополированию подвергаются различные детали арматуры трубопроводов

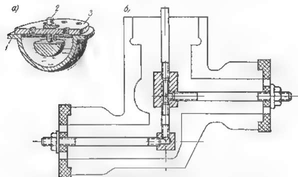
Детали арматуры обычно имеют весьма сложную конфигурацию, и электрополирование их вызывает затруднения

Каждая деталь требует изготовления индивидуального приспособления для крепления, монтирования катода и т. д.

В случае необходимости электрополирования полых крупных деталей внутренняя полость их может быть использована как ванна-электролизер. Катод в этом случае монтируется внутри детали (фиг. 31, *а*).

Внутренняя поверхность деталей арматуры со сложной конфигурацией электрополируется с дополнительными катодами, собранными из отдельных элементов (фиг. 31, *б*).

Для деталей, изготовленных из стали марки 1Х18Н9Г, используется электролит, состоящий из 65% фосфорной кислоты,




Фиг. 31. Электрополирование внутренних поверхностей
*а*—использование внутренней полости детали как ванны-электролизера.
*1*—деталь (анод), *2*—катод, *3*—изолирующая прокладка
*б*—полирование внутренней поверхности с применением дополнительного катода

15% серной и 6% хромового ангидрида. Электрополирование производят при температуре 80—82°С, плотности тока 50 *а/дм*² и времени полирования 4—5 мин. Съем металла в этом случае будет 5—7 *мк* в мин.

Режим обработки для каждой партии сложных деталей подбирается отдельно.

**Электролитическая доводка гладких цилиндрических калибров.** Электрополирование как доводка при изготовлении калибров может быть применено при соблюдении следующих условий:

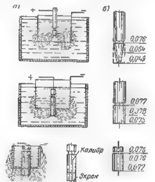
1) чистота поверхности калибра перед электрополированием должна быть не ниже 10-го класса (ГОСТ 2789—59),



2) величина припуска на доводку должна обеспечивать получение чистоты поверхности, соответствующей 12-му классу; это достигается при припуске на доводку 0,02—0,03 *мм*.

Доводка производится в электролите для углеродистых сталей.

Обеспечение требуемых размеров детали (в пределах 1—2-го классов точности) возможно при доводке лишь в случае равномерного съема металла. Равномерность съема металла зависит от вторичного распределения тока по поверхности детали. Вторичное распределение тока возникает в результате одновременного воздействия концентрации силовых линий и поляризации. Степень выравнивания плотности тока при этом характеризуется рассеивающей способностью ванны. Концентрацию силовых линий можно устранить применением защитных экранов и подбором оптимального расположения калибра относительно зеркала ванны.




Фиг. 32. Влияние положения калибра и экрана в ванне на характер съема металла.
*а*—схемы расположения калибра в ванне; *б*—характер съема металла (цифрами указаны величины съема металла в *мм*).

Экранирование осуществляется при помощи металлических цилиндров (экранов), прикрепленных к торцу калибра. Необходимо обеспечение надежного контакта между экраном и торцом калибра. Нарушение контакта приводит к ослаблению и даже к прекращению действия экрана. Степень экранирующего действия регулируется изменением диаметра и длины экрана. С увеличением длины экрана возрастает концентрация на нем силовых линий, в результате калибр при доводке приобретает меньшую конусность. Увеличение диаметра экрана приводит к значительному уменьшению съема металла на поверхности калибра, расположенной вблизи от его торца.

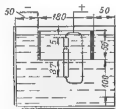
Наилучшие результаты при доводке получаются в случае использования цилиндрического свинцового экрана, диаметр и высота которого равны диаметру калибра.

Положение калибра относительно катода, а также дна ванны и уровня электролита влияет на степень рассеивания силовых линий, концентрация тока на участках, более глубоко погруженных в электролит, будет большей. Существенное значение имеет также расстояние между электродами.

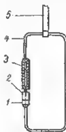
Подбором положения калибра в ванне и межэлектродного расстояния можно в известной степени регулировать распределение тока на обрабатываемой поверхности (фиг. 32).

Одним из способов получения равномерного съема металла является использование нерабочей части калибра в качестве экрана. С этой целью калибр погружается в электролит рабочей частью вверх Для устранения концентрации тока на участке рабочей поверхности калибра, прилегающем к его торцу, последний должен находиться на 4—5 *мм* ниже уровня электролита (фиг. 33) Получающееся при такой установке изменение диаметра калибра не выходит за пределы допуска на его изготовление Калибры подвешиваются в ванне на индивидуальных приспособлениях

На фиг. 34 приведена схема приспособления, изготовленного из проволоки *4*. К торцам рукоятки *3* калибра *2* прижимаются концы стальной (пружинящей) проволоки Этим обеспечивается достаточно плотный контакт приспособления с деталью




Фиг 33. Схема расположения электродов при электрополировании калибров.




Фиг. 34. Приспособление для электрополирования калибров.

*1* - сециальный экран *2* калибр, *3* - рукоятка калибра *4* пружинящая проволока, *5* контактный крючок

Оптимальная анодная плотность тока при доводке в течение 3 мин составляет 70 *а/дм²*, съем металла при этом достигает 0,025 *мм*. Для калибров 1 и 2-го классов точности припуск под электрополирование следует оставлять не более 0,02—0,03 *мм* на диаметр По графику (фиг 35) с достаточной точностью устанавливается продолжительность доводки, необходимая для снятия припуска Значительная скорость растворения металла при электрополировании требует тщательного контроля режима процесса Колебания температуры при обработке калибров не должны превышать ± 1°.

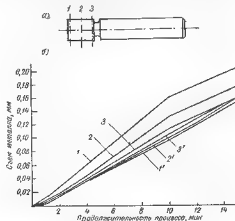
Точность соблюдения заданного электрического режима на каждом из калибров одновременно обрабатываемой партии обеспечивается раздельной подачей питания на каждое приспособление с установлением режима реостатом по амперметру

**Электрохимическое полирование деталей текстильных машин.** Целью электрополирования деталей текстильных машин является



снятие заусенцев, микрошероховатостей и декоративная отделка поверхности

Для достижения хорошего сглаживания поверхности режим работы, приспособления для крепления деталей и расположение деталей в ванне подбираются для каждого вида деталей отдельно. Так, например, для электрополирования больших деталей кардочесальных машин — гребней очеса, ножей, футляров — были применены специальные технологические приемы. Гребень очеса

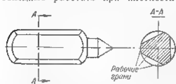



Фиг 35. Зависимость съема металла в сечениях *1*, *2* *3* калибра от продолжительности электрополирования *а*—калибр, *б* кривые съема металла

*3* без применения экрана, при плотности тока $D_a$=70 *а/дм²* *1'* *3'*—с применением экрана, при плотности тока $D_a$=13 *а/дм²*

представляет собой стальную полосу размером 1000 × 40 × 25 *мм*, с одной стороны которой нарезаны зубья высотой 5 *мм*. Для достижения хорошего сглаживания поверхности металла и освобождения поверхности зубьев от заусенцев и шероховатостей электрополирование проводилось в течение 10 мин, при плотности тока 50 *а/дм²* и температуре 70—80° С Качество электрополирования зависит от расположения детали в ванне при положении деталей зубцами вверх достигается более равномерный съем металла и исключается искажение формы зубцов. Вследствие большой концентрации тока на краях зубцов при положении гребня зубцами вниз наблюдается интенсивное растворение металла зубцов и искажение их формы.

Для качественного электрополирования крупногабаритных деталей (футляров и ножей кардочесальной машины) площадью до 60—80 *дм²* требуется большая сила тока (3000—4000 *а*) По технологическим причинам такая большая сила тока не может быть подведена к детали, поэтому в производственных условиях снижают плотность тока до 15—20 *а/дм²* и увеличивают продолжительность полирования до 20 мин. При этом режиме электрополирования поверхность металла приобретает блеск. Однако для снятия заусенцев и повышения чистоты поверхности деталей необходимо работать при плотности тока 35—50 *а/дм²*.



Фиг 36. Клапан подачи горючего

При электрополировании более мелких деталей основную трудность составляет получение поверхности, соответствующей требованиям чистоты. Так, например, на всех кольцах, изготовленных из углеродистой стали, предусматривается чистота поверхности не ниже 10—11-го класса по ГОСТ 2789—59 Механическое полирование колец абразивными порошками обеспечивает чистоту поверхности только до 7-го класса, а в этом случае у деталей оказывается слишком большой коэффициент трения Электрополирование дает возможность повысить чистоту поверхности до 10—11-го класса по ГОСТ 2789—59, снизить в 3—4 раза коэффициент трения и увеличить коррозионную стойкость

**Электролитическое полирование клапана подачи горючего.** Клапан подачи горючего (фиг 36), одна из деталей карбюратора, изготовляется из прутка трехгранного сечения со срезанными по описанной окружности углами Материалом для прутка служит нержавеющая сталь марки ЭЯ2.

Поступающие на завод прутки имеют на поверхности окалину, риски и гребешки; эти дефекты при механической обработке полностью не устраняются, что вредно сказывается на работе клапана

Для электролитического полирования клапана применяется электролит, содержащий 62% ортофосфорной кислоты (уд. вес 1,6), 38% химически чистой серной кислоты (уд. вес 1,84) или олеума; в этот состав добавляется 30 *г* хромового ангидрида на 1 *кг* электролита Удельный вес электролита должен составлять 1,6—1,8. Плотность тока в процессе электролитического полирования можно варьировать в пределах 25 70 *а/дм²*, а рабочая температура — в пределах 70—145° С В качестве катода применяются свинец, графит и другие нерастворимые в электролите материалы. При температурах, близких к нижнему пределу, работают в свежеприготовленной ванне, имеющей темно-коричневую окраску; по мере выработки электролита и перехода хрома в трехвалентный (раствор принимает зеленую окраску) рабочую температуру ванны постепенно доводят до верхнего предела. Продолжительность процесса 3—5 мин



Перед обработкой клапаны жестко закрепляют на подвеске, изготовленной из медной проволоки; при слабом креплении деталей в точках контакта с подвеской происходит разъедание металла вследствие местного перегрева. Расстояние между деталями должно быть не менее 25—30 *мм*.

Перед электролитическим полированием производят электролитическое обезжиривание и промывку

В процессе электролиза подвеска с деталями должна быть строго параллельна рабочим плоскостям свинцовых катодов Несоблюдение этого условия приводит к браку.

По окончании процесса электролитического полирования детали быстро переносят в ванну с проточной водой и тщательно промывают.

Задержка между операциями электролитического полирования и промывкой может вызвать разъедание поверхности электролитом. По окончании промывки для удаления последних остатков кислого электролита детали подвергают нейтрализации в течение 0,5—1,0 мин в растворе, содержащем 10 25 *г/л* тринатрийфосфата, что необходимо в целях предохранения деталей от коррозии, которая может быть вызвана остатками электролита. После нейтрализации детали промывают холодной, а затем горячей водой, снимают с подвесок и сушат в сушильном шкафу в течение 15—30 мин

Годность деталей проверяется по внешнему виду. Поверхность после электролитического полирования должна быть ровной, гладкой и блестящей. На поверхности не допускается точечной коррозии, следов разъедания, полос и белых матовых пятен Применение электролитического полирования улучшило качество работы и клапанов и облегчило выявление на поверхности дефектов механической обработки и пороков металла

**Электрополирование лент, фольги, проволоки.** В промышленности еще недостаточно распространен опыт электролитического полирования по биполярному методу, хотя этот метод имеет большие перспективы для электрополирования лент, фольги, проволоки и других аналогичных деталей

Метод биполярного электрополирования металлической ленты и проволоки разработан Всесоюзным научно-исследовательским институтом легкого и текстильного машиностроения (ВНИИЛтекмаш).

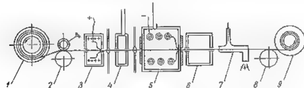
По разработанной ВНИИЛтекмаш схеме биполярного метода электрополирования (фиг. 37) поверхность ленты или проволоки проходит без соприкосновения с металлическим контактом

Положительный полюс источника постоянного тока присоединяется к электродам первой ванны, а отрицательный — к электродам второй ванны, расположенной последовательно за первой Первая ванна заполняется обезжиривающим раствором, вторая — электролитом для электрополирования. При прохождении

между электродами в первой ванне лента поляризуется катодно Во второй ванне лента, проходя между электродами отрицательного знака, поляризуется анодно. Полирование поверхности ленты или проволоки осуществляется при создании соответствующего режима электрополирования (температуры электролита, плотности тока и продолжительности процесса).

Для закаленной ленты первостепенное значение имеет охлаждение ее в пространстве между обезжиривающей ванной, промывной и ванной для электрополирования Охлаждение осуществляется сжатым воздухом, который подается через специальные сопла на ленту

Биполярный способ подвода тока позволяет производить непрерывное электролитическое полирование тончайших лент без повреждения (прижога).




Фиг 37 Схема биполярного метода электрополирования

1 приемная стойка 2—направляющий ролик. 3 первая ванна: 4 первая промывка, 5 вторая ванна 6 вторая промывка 7 сушка, 8 упорный шарнир; 9—барабан для сматывания ленты.

По биполярному принципу сконструированы специальные установки модели ЭПЛ-2 для непрерывного полирования тончайших лент и проволоки и установка модели ЭПЛ-3, основанная на многоячейковом методе биполярного полирования лент и проволоки

Установка ЭПЛ-2 состоит из сварной рамы, верх которой служит столом для размещения намоточных дисков, рабочих ванн и пульта управления. Во внутренней части рамы находятся станция управления и генераторная группа Сзади рамы помещается вентиляционная стойка с всасывающим и нагнетательным вентиляторами. Наверху установлена стойка, на ось которой надевается диск с лентой Лента, сматываясь с диска, контактирует с направляющим роликом и поступает в первую ванну с обезжиривающим раствором Эта ванна для обезжиривания выполнена из стали Электроды (аноды) железные или никелевые Разъемные фильтры, через которые проходит полируемая лента или проволока, вставляются в отверстия торцовых стенок ванны

Лента из обезжиривающей ванны поступает в промывочное устройство, где интенсивно промывается струями воды, направленными перпендикулярно поверхности ленты Одновременно лента охлаждается



Из промывочного устройства лента поступает во вторую ванну (электролизер) для электрополирования, герметически закрытую сверху колпаком. Эта ванна представляет собой стальной сварной резервуар прямоугольной формы, футерованный свинцом и выложенный стеклянными пластинками На медных штангах, расположенных параллельно продольным стенкам, подвешены катоды-крючки из красной меди, помещенные в фарфоровые диафрагмы

Электролизер имеет двойное дно и двойные продольные стенки, между которыми заливается подогретое масло Сверху он соединен со всасывающей трубой вентилятора, которая производит отсос вредных паров электролита, а также создает в колпаке разряжение, препятствующее вытеканию электролита через входные и выходные фильеры

Автоматическое устройство установки (станция управления) обеспечивает движение ленты с постоянной скоростью и точностью (±5%), а также контроль протекающего процесса по току и температуре

Непрерывное размерное электролитическое полирование тончайших лент по биполярному методу позволяет получать зеркальную поверхность с чистотой, не достижимой механическими методами полирования При этом механические свойства тончайшей ленты остаются без изменения, а острые кромки скругляются

Лента из стали У9А и ХО5, отполированная в фосфорно-хромовом электролите, приобретает повышенную устойчивость против коррозии Так, электрополированная лента, находясь без смазки в течение ряда лет, совершенно не имела пятен коррозии, тогда как исходная лента, будучи смазанной, была полностью покрыта коррозией

Производительность установки 2—5 *м/мин*

В целях повышения производительности биполярного процесса электрополирования ВНИИЛтекмаш разработана установка ЭПЛ-3, основанная на многоячейковом методе

На принципиальной схеме установки ЭПЛ 3 (фиг 38) положительный и отрицательный полюсы источника постоянного тока присоединяются не к двум электролизерам, разделенным промывочным устройством, как это имеет место в установке ЭПЛ-2, а к катодным и анодным ячейкам одного электролизера, имеющего перегородки Электролизер и перегородки изготовляются из изоляционного материала

Установка ЭПЛ-3 состоит из размоточного устройства, многоячейкового электролизера, промывочного, сушильного и намоточного устройств и автоматической станции управления

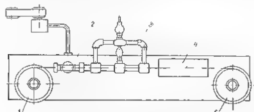
Электролизер прямоугольной формы размером 1600×150×250 *мм* облицован фторопластом Перегородки передвижные и имеют в центре прорези для прохождения полируемого изделия (ленты, проволоки). На торцовых стенках электролизера имеются втулки из фторопласта, закрывающиеся разъемными пробками (фильерами) На текстолитовых подставках установлены четыре

медных штанги (по две с каждой стороны). Если в одной ячейке расположены отрицательные электроды, то в соседней ячейке — электроды противоположного знака.

Автоматическое устройство установки обеспечивает изменение скорости подачи изделия (в пределах 1 · 20), постоянство температуры электролита и сушильного шкафа и электрический режим ванны.

Установка ЭПЛ 3 позволяет успешно полировать металлические ленты или проволоку из различных марок стали. Оптимальная длина одновременно полируемого участка устанавливается при помощи передвижных перегородок.

Для электрополирования лент и проволоки, изготовленных из стали марок У10А, Х05, 1Х18Н9Т, ЭИ142, применяется электро-



Фиг. 38. Принципиальная схема установки ЭПЛ 3.
1—намоточное устройство; 2—сушка; 3—промывочное устройство; 4—электролизер; 5—размоточное устройство

лит, в состав которого входит 200—250 *г* хромового ангидрида на литр фосфорной кислоты удельного веса 1,6. Удельный вес приготовленного электролита 1,7—1,78.

Многоячейковый способ позволяет увеличить скорость электрополирования проволоки и ленты с 2—5 до 10—20 *м/мин*.

Установки типа ЭПЛ обеспечивают:

1) получение полированных лент и проволоки с высокой чистотой поверхности;

2) защиту лент и проволоки от коррозии при длительном хранении;

3) доводку лент и проволоки до нужных размеров;

4) одновременное проведение комбинированных процессов, например декапирования и хромирования или электрополирования с последующим хромированием;

5) снятие с поверхности лент и проволоки окисных пленок и неглубокой коррозии (электротравление) и другие электрохимические процессы.

**Электролитическое полирование сварных швов.** Зоны сварных швов всегда подвергаются коррозии в любой аппаратуре, в частности, химической, так как при наличии на них окалины между



зоной шва, покрытой окалиной, и чистым металлом возникает коррозия. В процессе коррозии выпадают шлаковые включения в шве металла и возникают неплотности шва, наиболее подверженные коррозии. Для устранения этого явления сварные швы малогабаритной химической аппаратуры обычно подвергают травлению. Травление крупногабаритной аппаратуры со сварными швами затруднительно и связано с большим расходом кислот.

Механическая очистка сварных соединений изделий из нержавеющей стали очень трудоемка и не всегда обеспечивает чистоту сварного шва. Электрополирование крупногабаритной аппаратуры обычными методами связано не только с большим расходом электролита, но и с необходимостью оснащения цеха мощными источниками постоянного тока. Поэтому возникла мысль о модификации метода электролитического полирования с применением выносного катода, который должен являться рабочим инструментом, достаточно удобным в работе и доступным любому производству.

Опыт показал, что очистку сварных швов нецелесообразно производить всегда одним и тем же инструментом, так как тонкая окалина и поверхностные шлаковые включения легко снимаются любым щеточным катодом. В случае же грубой и толстой окалины и глубоких шлаковых включений необходима более продолжительная очистка шва и нецелесообразно применение щетки в качестве катода. В последнем случае может быть использовано специальное приспособление, состоящее из латунной или медной катодной рамки, дно которой имеет отверстия диаметром 0,5 *мм* с расстоянием между ними 15 *мм*.

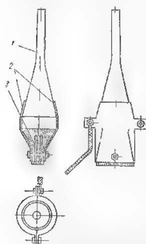
Очищаемое изделие присоединяют к положительному полюсу источника постоянного тока (аноду). В цепь, идущую от отрицательного полюса источника тока (катода), включают амперметр, реостат и выносной катод. На нижнюю плоскость катода укрепляется слой ткани, впитывающий в себя электролит. Опыты показали, что наилучшие результаты дает применение стеклянной ткани. Ток подводится к раме — подвижному катоду посредством гибкого провода.

Электролит поступает в рамку через трубку, которая соединяется при помощи резинового шланга с резервуаром, где находится электролит. Целесообразно работать одновременно с несколькими рамками, включенными параллельно в цепь тока.

Для снятия тонкой окалины можно применять обычную малярную кисть № 20 из конского волоса, на которую надето специальное токоподводящее приспособление (фиг. 39). При работе кисть смачивают электролитом и водят ею по очищаемому месту.

Продолжительность очистки зависит от толщины окалины и от глубины шлаковых включений и составляет 10—25 мин. В случае наличия на шве грубой окалины и большого количества шлаковых включений полное снятие таковых кистью нецелесообразно. Тогда применяют электролитическую очистку рамкой в продолжение 5—10 мин. При этом основной слой окалины и шлаковых

включений очищается, остатки же окалины у подрезов и шлаковых включений в рельефе шва сильно разрыхляются. Разрыхленные остатки окалины и шлаковых включений можно счищать стальными щетками Если к очищаемому изделию предъявляются особые требования в отношении чистоты поверхности, то после механической очистки рекомендуется вторичная электролитическая очистка шва кистью в продолжение 1—2 мин



Фиг 39. Кисть для электролитической очистки швов
1—кисть малярная; 2—медная оправа, 3—медные контактные пластины.

Хорошую очистку сварного шва и пассивирование очищенной поверхности обеспечивает сернофосфорнохромовый электролит Электролит предварительно не разогревают

Электролитическую очистку сварных соединений производят при напряжении 6—12 *в*. Плотность тока не регулируется О ходе процесса судят по вспениванию электролита После электролитической очистки изделие промывают из шланга проточной водой и сушат сжатым воздухом

Поверхность металла шва и переходной зоны, захватываемой кистью или рамкой, после электролитической очистки становится светлой и блестящей

**Электрополирование труб.** В области электролитического полирования особое место занимает электрополирование труб из нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т

Как известно, механическая очистка внутренней поверхности труб большой длины (6—8 *м*) от окалины и других загрязнений представляет значительные затруднения Химическая очистка труб также не дает положительных результатов. При химической очистке часто возникает точечная коррозия, растравливание поверхности и неудовлетворительно очищаются места с утолщенной или закатанной окалиной

При очистке электрополированием внутренняя поверхность труб приобретает гладкость, блеск, повышенную коррозионную стойкость, уменьшается сопротивление потокам жидкости и газов

Преимуществом электрополирования является также высокая скорость процесса и возможность применения поточности

Технология электрополирования труб имеет свои особенности Важными моментами в технологии электрополирования внутренней поверхности труб являются центрирование катода, крепление катода и трубы, заполнение полируемого пространства электролитом и т д



В настоящее время электрополирование труб в промышленности производится в двух вариантах: в стационарной ванне и в установке с протоком электролита

Технология электрополирования труб включает следующие операции и производится по следующей схеме

1) подготовка поверхности изделий к электрополированию,
2) монтаж катодов и контактных приспособлений (при полировании в ваннах) либо установка полируемых изделий в приспособление для полирования,
3) погружение полируемого изделия в электролит либо включение подачи электролита (при проточном полировании);
4) поддержание заданного режима (температуры, плотности тока, длительности процесса, состава электролита),
5) выключение тока и извлечение изделия из электролита (или прекращение подачи электролита),
6) первая промывка изделия в проточной воде до исчезновения следов электролита,
7) промывка изделия нейтрализующим щелочным раствором,
8) вторая промывка изделия водой,
9) сушка,
10) контроль.

При подготовке поверхности труб к электрополированию следует произвести правку и торцовку труб, а также промывку их в обезжиривающем щелочном растворе и химическое травление

Раствор для обезжиривания может быть использован любой из имеющихся в наличии цеха или участка Так, например, хорошо обезжиривать в растворе, содержащем 20 25 *г/л* тринатрийфосфата, 3 *г/л* моющей добавки ОП-7 Температура раствора 40—50°

В целях более равномерного электрополирования поверхность трубы подвергают химическому травлению и осветлению. Окалина на поверхности трубы разрыхляется химическим травлением и уносится осветляющим раствором Химическое травление проводится в растворе, состоящем из 20% серной кислоты, 5% азотной кислоты (или 20—30 *кг/м*³ селитры), 5% поваренной соли Химическое осветление осуществляют в 10-процентном растворе азотной кислоты в течение 5—10 мин, а также в любом другом осветляющем растворе.

Подготовленная таким образом труба в дальнейшем подвергается электрополированию

Ниже приводятся описание, характеристики и особенности электрополирования труб в стационарной ванне и в установке с протоком электролита Более совершенным методом электрополирования труб является электрополирование с протоком

Технология электрополирования труб длиной 6—7 *м* в стационарной ванне применяется в промышленности с 1950—51 гг.

В отличие от технологии электрополирования мелких деталей, электрополирование труб производится последовательно, отдельными участками, так как для электрополирования больших площадей необходимо применение тока порядка 6000—7000 *а*. Подвод такого тока весьма затруднителен, и, кроме того, большая сила тока вызывает сильный разогрев электролита, обильное газовыделение и разложение входящих в электролит компонентов

Трубы полируют путем продвижения катода вдоль трубы. Длина катода обусловлена размером трубы и плотностью подводимого тока и колеблется от 1—2 *мм* (для труб ∅6 *мм*, причем вся поверхность не изолирована) до 170 *мм* для труб ∅200 *мм*

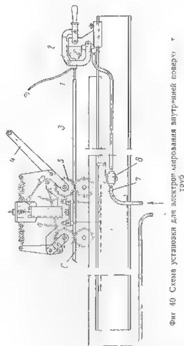
Более широкое применение в промышленности нашли установки для электрополирования труб с протоком электролита. Установки разработаны для электрополирования как внутренней так и для наружной поверхности труб

В основу конструкции установок с протоком для электрополирования внутренней и наружной поверхности труб положен используемый в стационарной ванне принцип последовательного электрополирования трубы небольшими участками. При этом обработка труб осуществляется путем непрерывного перемещения их относительно катода

На фиг 40 показана схема установки для электрополирования внутренней поверхности труб. Головка катода, изготовленная из медной или латунной трубки, соединена с магистралями, подающими электролит и постоянный ток. Катод *1* укреплен в специальном приспособлении *2*. На катод насаживается полируемая труба *3*. Поворотом рукоятки *4* поднимают верхние ролики *5* и щетки *7*, трубу с катодом укладывают на нижние ролики *6* и закрепляют верхними роликами. По окончании монтажа трубы включают подачу электролита (краном *8*) и электрический ток. Из бачка электролит поступает по магистрали в трубу. После 20—30 сек выдержки включают привод подающих роликов. При передвижении труб со скоростью от 150 до 500 *мм/мин* достигается удовлетворительное полирование внутренней поверхности. По окончании полирования всей трубы движение роликов останавливают, делают выдержку 20—25 сек. и выключают подачу постоянного тока и электролита. Освобожденную от зажимного приспособления трубу снимают с катода и вместо нее насаживают следующую

Электрополирование наружной поверхности труб осуществляется на другой установке (фиг. 41). Полируемая труба *1*, снабженная наконечником *3*, проталкивается через пару роликов *4* и манжет *5* таким образом, чтобы наконечник вышел на противоположную сторону полирующего цилиндра, но передний конец трубки находился бы в границах медного катода *7*. Когда отверстия манжет закроются полируемой трубкой с одной стороны и ее наконечником с другой, полость цилиндра *6* наполняют электролитом до сливной трубки *11*

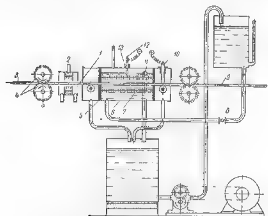




Фиг 40 Схема установки для электрополирования внутренней поверхности труб

Медный катод *7* имеет цилиндрическую форму с крупными отверстиями для свободного протекания электролита. По окончании заполнения полости цилиндра к трубе и катоду подают постоянный ток при помощи контактов *10* и *12* и щетки *13*. После выдержки 20—30 сек. включают приводные ролики *4*, проталкивающие полируемую трубу со скоростью 150—650 *мм/мин*.

Когда противоположный конец полируемой трубы достигает входных тянущих роликов, введенный в следующую трубу короткий соединяющий стержень *9* вставляют в конец первой, в результате чего вторая трубка, захваченная тянущими роликами, проходит путь первой.




Фиг. 41. Схема установки для электрополирования наружной поверхности труб

Таким образом осуществляется непрерывное электрополирование наружной поверхности труб при одновременной непрерывной промывке их проточной водой в приспособлении *2*.

При переходе на полирование труб другого диаметра устанавливают соответствующие манжеты и ролики. Скорость обмена электролита, поступающего в полирующий цилиндр самотеком, регулируется пробковым краном *8*.

Электролиты для электрополирования труб в стационарной ванне и в установке с протоком существенно отличаются друг от друга.

Электрополирование труб в стационарной ванне осуществляют при помощи электролита, составленного на основе фосфорной кислоты с добавкой серной кислоты и хромового ангидрида (электролит № 2, табл. 11). Для электрополирования труб в установке с протоком в качестве электролита использована смесь фосфорной и серной кислот (электролит № 1, табл. 1.)



Таблица 11

**Состав и физические свойства электролитов для электрополирования труб**

| Состав (в % от веса) и показатели свойств электролита | Электролиты | |
|---|---|---|
| | № 1 | № 2 |
| Серная кислота | 18—22 | 7—10 |
| Фосфорная кислота | 42—44 | 63—65 |
| Хромовый ангидрид | — | 7—9 |
| Вода | 34—40 | 16—22 |
| Вязкость в сантипуазах: | | |
| свежеприготовленного | 2—5 | 6—8 |
| отработанного | 20—30 | 30—50 |
| Удельный вес в $г/см^3$: | | |
| свежеприготовленного | 1,6—1,65 | 1,6—1,7 |
| отработанного | 1,8—1,9 | 1,8—1,9 |

Режим электрополирования и состав электролита для электрополирования труб в стационарной ванне и в установке с протоком приведены в табл. 12.

Таблица 12

**Режимы электрополирования труб**

| Показатель режима | Полирование в ваннах. Электролиты | | Полирование на установке с протоком в электролите |
|---|---|---|---|
| | № 1 | № 2 | № 1 |
| Плотность тока в $а/дм^2$ | 50—100 | 40—80 | 150—200 |
| Температура электролита в °С | 50—70 | 45—55 | 60—80 |
| Продолжительность полирования в мин. | 60—80 | 70—85 | 20—30 |
| Скорость перемещения катода при полировании в *м/мин* | | | |
| внутренней поверхности | 6—8 | 5—7 | 0,3—0,4 |
| наружной поверхности | — | — | 0,7—0,8 |
| Давление электролита в $кГ/см^2$ | — | — | 1,5—5,0 |
| Продолжительность промывки в мин. | 1,5—2 | 2—3 | 1—1,5 |

Работоспособность электролита (до регенерации) изменяется в зависимости от условий эксплуатации и ориентировочно находится в пределах 250—350 *а-ч/л* электролита Регенерация электролита в условиях производства может производиться любыми приемами (анодным окислением трехвалентного хрома, декантацией с последующим добавлением свежего электролита, доведением содержания всех компонентов до заданных концентраций и т д), обеспечивающими восстановление его исходных свойств

Электролит № 1 пригоден для эксплуатации непосредственно после составления и доведения его до рабочей температуры

Электролит № 2 для приведения его к рабочему состоянию должен быть после составления прогрет до 100—120°С в течение 2-х часов либо проработан с пропусканием через него тока в количестве 10—15 *а-ч/л* при свинцовых электродах

Приготовление электролитов для электрополирования труб не отличается от приготовления электролитов для электрополирования деталей машин, инструмента или иных изделий и осуществляется в следующей последовательности.

1. В воду, количество которой определяется по расчету, вливают фосфорную кислоту или растворяют ангидрид фосфорной кислоты

2. Предварительно растворенный в воде, входящий в состав электролита хромовый ангидрид (только для электролита № 2) вливают в раствор фосфорной кислоты, или же кристаллический хромовый ангидрид укладывают в решетчатый свинцовый сосуд. Сосуд опускают в раствор фосфорной кислоты и выдерживают при нагревании до полного растворения хромового ангидрида.

3. В последнюю очередь в раствор добавляют серную кислоту

Полирующие свойства электролитов зависят от величины его удельного веса, вязкости и химического состава

Анализ химического состава электролитов для электрополирования труб (на содержание входящих в него кислот и примесей) обычно производят перед сливом отработанного электролита для регенерации, а также в случае появления на полируемых изделиях дефектов, связанных с изменением состава электролита Вязкость и удельный вес электролитов (табл. 11) определяют один раз в смену перед началом работы Определение вязкости и удельного веса производится при температуре электролита 20°С

Повышение температуры электролита способствует интенсивности проведения процесса, интенсифицирует растворение анода, способствует насыщению прианодного слоя продуктами электролиза Кроме того, увеличение температуры уменьшает вязкость раствора и облегчает диффузию продуктов реакции от анода в массу электролита и обратно

Благодаря вязкости электролита сопротивление его в интервале температур 20 -40°С велико, и электрополирование в этом случае требует повышенного напряжения тока Оптимальной температурой при электрополировании следует считать температуру 70—80°С.



Необходимо следить за надлежащим заполнением электролитом цилиндрического катода, так как в случае неполного заполнения трубы электролитом на ее поверхности образуются матовые растравленные пятна

Скорость циркуляции и давление при подаче электролита существенно не влияют на качество электрополирования Оптимальной скоростью циркуляции электролита при электрополировании наружной поверхности труб считается скорость 500 *мм/мин*, оптимальным давлением при прокачивании электролита в процессе электрополирования внутренней поверхности труб является 0,5 2,0 *ат*

Съем металла с поверхности происходит равномерно как при электрополировании в ванне, так и при электрополировании на установке с протоком. Съем металла в среднем составляет 0,2—0,3 *мм* при отклонении ±10—20 *мк* на сторону при выдержке 4—5 мин

Предварительное травление поверхности труб благоприятно влияет на режим электрополирования

Электрополирование травленых труб может проводиться на пониженных плотностях тока

**Применение электролитического полирования в металлографии.** Одним из прогрессивных методов в области металлографического изучения металлов является метод электрохимического приготовления шлифов электрополированием. Для этого образец, подготовленный механическим шлифованием, погружается в качестве анода в ванну, заполненную специальным электролитом, выдерживается при заданном режиме определенное время, после чего извлекается, промывается и просушивается

Качество электрополированной поверхности шлифа зависит от состава электролита, его температуры, плотности тока, продолжительности полирования и состава полируемого металла

Электрополирование для целей металлографии может быть применено в следующих случаях.

1) электрополирование шлифов для создания гладкой полированной поверхности, пригодной к последующему химическому травлению с целью выявления структуры;

2) травящее электрополирование, производимое для сглаживания поверхности шлифа и одновременного выявления его микроструктуры,

3) промежуточное электрополирование, проводимое в качестве операции между грубой и тонкой механической подготовкой поверхности шлифа и преследующее цель сокращения длительности этой операции,

4) специальное электрополирование, осуществляемое с целью выявления макроструктуры металла, определения склонности его к интеркристаллитной коррозии, обнаружения деформированных (растянутых, наклепанных) мест исследования различных нарушений сплошности металла (трещин, флокенов и т п).

Выбор того или иного варианта определяется в каждом частном случае требованиями к качеству шлифа. Наиболее часто используются первый и второй варианты — собственно электрополирование и травящее электрополирование. Наиболее редко проводится промежуточное электрополирование.

Электролитическое полирование для подготовки шлифов обладает рядом существенных технико-экономических преимуществ перед механическим. Эти преимущества заключаются в следующем:

1) электрополированная поверхность свободна от каких-либо термических или механических изменений, которые неизбежны при механических способах обработки;

2) повышенная чистота электрополированной поверхности и отсутствие на ней следов деформаций позволяет наблюдать истинную, неискаженную структуру исследуемого металла, что особенно ценно в применении к мягким и легким металлам;

3) электрополированием создается пригодная к микроисследованию поверхность. При этом сохраняющийся зачастую макрорельеф не препятствует детальному изучению микроструктуры;

4) электрополированная поверхность шлифов особенно удобна для рассмотрения структуры при больших и чрезвычайно больших увеличениях, причем на электрополированном микрошлифе выявляются тончайшие детали структуры, обычно исчезающие при механической подготовке (первичное зерно мартенситных структур, микроликвационные участки и т. п.);

5) электрополирование значительно повышает производительность металлографических лабораторий, сокращая длительность подготовки единичного шлифа и позволяет производить одновременную обработку нескольких шлифов без увеличения количества обслуживающего персонала;

6) электрополирование для целей металлографии может осуществляться не только на специальных образцах, но и непосредственно на поверхностях массивных деталей и конструкций, без нарушения их целости.

В табл. 13 перечислены некоторые варианты применения электрополирования в исследовательской практике.

Электролитическое полирование металлографических микрошлифов известно сравнительно давно, причем также хорошо известны значительные преимущества этого способа перед обычными способами механического полирования. Тем не менее в заводских лабораториях этот прогрессивный процесс используется совершенно недостаточно. Основной причиной этого является отсутствие необходимого оборудования и аппаратуры, так как несмотря на простоту процесса сборка схем и установок силами завода часто бывает затруднительна.

Установка, сконструированная[1] для электрополирования и электротравления металлографических шлифов, пригодна также для различных электрохимических работ в лабораторных масштабах.

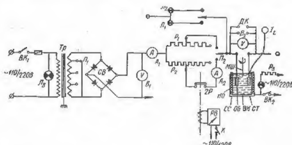
[1] Авторы: Л. Я. Попилов, К. И. Дубинин, Т. Н. Пяндрина, М. М. Крючкова.



Таблица 13

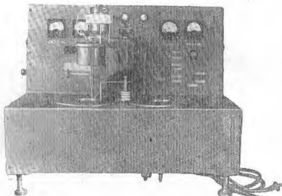
**Области использования различных методов подготовки поверхности металлографических шлифов**

| Назначение | Механическое полирование | | | Шлифование тонкое абразивное | | | Шлифование черновое с абразивом | | Электрополирование без предварительной механической подготовки | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | с химическим травлением | с травлением электрополированием | с электротравлением | с химическим травлением | с травлением электрополированием | с электротравлением | с химическим травлением | с травлением электрополированием | без травления | с последующим химическим травлением или электротравлением | с травлением электрополированием |
| Исследование микроструктуры при массовом контроле | + | + | + | 0 | + | 0 | — | + | + | + | + |
| Микроструктурный анализ тонкокатаного материала (лист, лента) | + | + | + | 0 | + | 0 | — | + | + | + | + |
| Выявление границ зерен в металлах и сплавах | 0 | + | + | 0 | + | 0 | — | 0 | ? | + | + |
| Детальное исследование микростроения единичных шлифов сложной структуры | + | + | + | — | 0 | — | — | 0 | 0 | + | + |
| Выявление микроликвации | 0 | + | + | — | 0 | — | — | 0 | + | + | + |
| Контроль качества термической обработки | + | + | + | + | + | + | — | 0 | 0 | + | + |
| Качественная и количественная оценка неметаллических включений | + | + | + | 0 | + | 0 | — | 0 | + | + | + |
| Определение балла карбидной ликвации | + | + | + | 0 | + | 0 | — | 0 | + | + | + |
| Выявление местных дефектов строения и состояния | 0 | + | + | 0 | + | 0 | — | 0 | + | + | + |



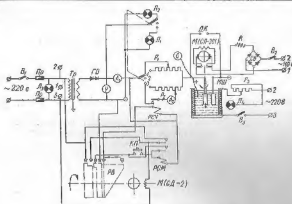

Фиг. 42. Электрическая схема установки:

$ВК_1$—выключатель сети; $ВК_2$—выключатель нагрева; $Л_1$—сигнальная лампа «полировка»; $Л_2$—сигнальная лампа «травление»; $Л_3$—сигнальная лампа «включено»; $П_1$—переключатель напряжения; $П_2$—переключатель режимов; $СВ$—селеновый выпрямитель; $Тр$—понижающий трансформатор; $В_1$—вольтметр питающего напряжения; $В_2$—вольтметр напряжения на электродах; $А_1$—амперметр тока полирования; $А_2$—амперметр травящего тока; $Р_1$—реостат в цепи «полировка»; $Р_2$—реостат в цепи «травление»; $Р_3$—реостат в цепи нагрева; $РВ$—реле времени; $К$—кнопка; $2Р$—контакты реле времени; $НО$—нагревательная обмотка; $ВН$—ванна; $СС$—стеклянный стакан; $СТ$—стальной стакан; $ОБ$—образец; $МШ$—мешалка; $I_t$—указатель температуры; $ДК$—дополнительные клеммы для подключения выносных ванн.



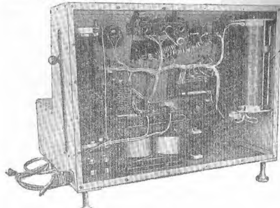
Фиг. 43. Установка для электрополирования (вид спереди).






Фиг. 44. Электрическая схема установки:

$КП$—контакт «пуск»; $ДК$—дополнительный контакт; $МШ$—мешалка; $П_1$—переключатель однополюсный на три положения; $Л_1$, $Л_2$, $Л_3$, $Л_4$—сигнальные лампы; $В_1$—выключатель сети; $В_2$—выключатель мешалки; $В_3$—выключатель нагрева; $Пр$—предохранитель; $G$—гальванометр ТЧ-1 с заменяемой шкалой; $А_1$—амперметр; $А_2$—амперметр; $V$—вольтметр; $СВ$—селеновый выпрямитель; $ГВ$—германиевый выпрямитель; $R$—сопротивление 50 *ом*; $Р_1$, $Р_2$, $Р_3$—реостаты; $РС4$—реле типа РС-4; $РСМ$—реле типа РС-4; $Тр$—трансформатор понижающий, 220/30 *в*; $М$—электродвигатель СЛ-261; $М$—электродвигатель СД-2; $РВ$—реле времени.



Фиг. 45. Монтаж установки (вид сзади).

Особенностью установки является несложность обращения с ней и возможность получения разнообразных режимов, необходимых как для полирования образцов, так и для выявления их микроструктуры.

Возможны следующие режимы работы установки:

| | |
|---|---|
| Сила тока . . . . . . . . . . . . . . | 0,1—15 *а* |
| Напряжение . . . . . . . . . . . . . | 8—30 *в* |
| Температура . . . . . . . . . . . . | 0—200° С |

Выдержка — любая при ручном управлении; 3—60 сек. при автоматическом управлении.

Электрическая схема установки показана на фиг. 42. Как видно из схемы, установка питается от сети переменного тока 110—220 *в* через понижающий трансформатор *Тр* и селеновый выпрямитель *СВ*. Мощность трансформатора — 300 *вт*. Напряжения вторичной обмотки (по ступеням 10, 20, 30 *в*) устанавливаются переключателем $П_1$.

Опыт эксплуатации установки показал наличие у нее ряда преимуществ, особенно при массовой обработке однотипных образцов, и явился основанием для дальнейшего совершенствования конструкции, позволив разработать[1] и выпустить небольшой серией усовершенствованную модель, описываемую ниже.

Универсальная установка (фиг. 43) предназначена для проведения операций электроавтоматического полирования и электролитического травления образцов, физико-механических и физико-химических испытаний и исследований, а также шлифов для металлографического анализа. Установка допускает осуществление широкого диапазона режимов, необходимых для обработки черных, цветных и специальных сплавов.

На фиг. 43 и 44 показан общий вид и электрическая схема универсальной установки для электротравления и электрополирования, а на фиг. 45 — монтаж установки внутри корпуса. Рама установки собрана из углового железа 20×20 *мм* и обшита листовым дюралюминием. В передней части установки вмонтированы две ванны из нержавеющей стали для холодной и горячей обработки. Ванна для холодной обработки омывается проточной водой, подводимой к ней через патрубок. Ванна для горячей обработки нагревается трубчатыми нагревательными элементами типа ТЭН, расположенными и закрепленными с внешней ее стороны и заключенными в теплоизоляционную асбестовую рубашку. Нагрев ванны включается тумблером, сигнализируется лампой и регулируется реостатом. Для контроля температуры нагрева на передней стенке установки вмонтирован прибор, проградуированный в градусах Цельсия.

[1] Авторы: Л. Я. Попилов, О. Б. Ткалич.

---

## ЛИТЕРАТУРА


1. Лайнер В. И., Электролитическая полировка металлических изделий, Гизместпром, 1947.
2. Лайнер В. И., Шамряев Г. К., Химическая и электрохимическая обработка металлов, Металлургиздат, 1951.
3. Попилов Л. Я., Электрополировка металлов, Машгиз, 1947.
4. Лайнер В. И., Электролитическая полировка и травление металлов, Машгиз, 1947.
5. Щиголев П. В., Электролитическое и химическое полирование металлов, Изд. АН СССР, 1958.
6. Богорад Л. Я., Электрохимическое полирование металлов, Машгиз, 1952.
7. Лайнер В. И. и Кудрявцев Н. Т., Основа гальваностегии, Металлургиздат, 1953.
8. Попилов Л. Я., Технология электрополирования металлов, Машгиз, 1953.
9. Куруклис Г. Л., Заточка режущего инструмента электрополированием, Машгиз, 1947.
10. Обмен производственно-техническим опытом, ЦБТИ, вып. 36, 1956.
11. Баташов К. П., Способ контроля и регулировки процесса электрополировки, Информационно-технический листок ЛДНТП, 1949, № 63.
12. Костецкий Б. И., Износостойкость деталей машин, Машгиз, 1950.
13. Несмеянова К. А., Электролитическая полировка черных металлов, кн. II, ЦНИИТМАШ, Машгиз, 1948.
14. Овечкин В. М., Универсальный электролит для электролитического полирования алюминия, Листок ТЕХСО, 1954, № 1553/85.
15. Куруклис Г. Л., Ахминеев Г. Я., Электрополирование алюминиевой посуды, Машгиз, 1954.
16. Левин Л. Э. и Рудак И. Г., Состав ванн для электрополирования алюминия, «Приборостроение», Машгиз, 1957, № 8.

ОГЛАВЛЕНИЕ


Предисловие . . . . . . . . . . . . . . 3
I. Области применения электрополирования . . . . . . 5
II. Сущность процесса электрополирования . . . . . . . 9
III. Схема технологического процесса электролитического полирования . 12
IV. Оборудование участка электрополирования . . . . . . . 15
V. Состав электролитов и режимы электролитического полирования различных металлов и сплавов . . . . . . . . 24
VI. Промышленое применение электрополирования . . . . . 38
Литература . . . . . . . . . . . . . . . 69